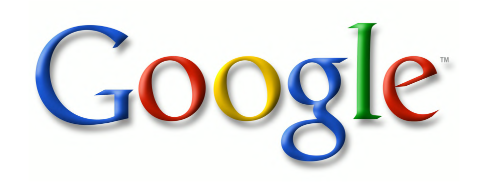
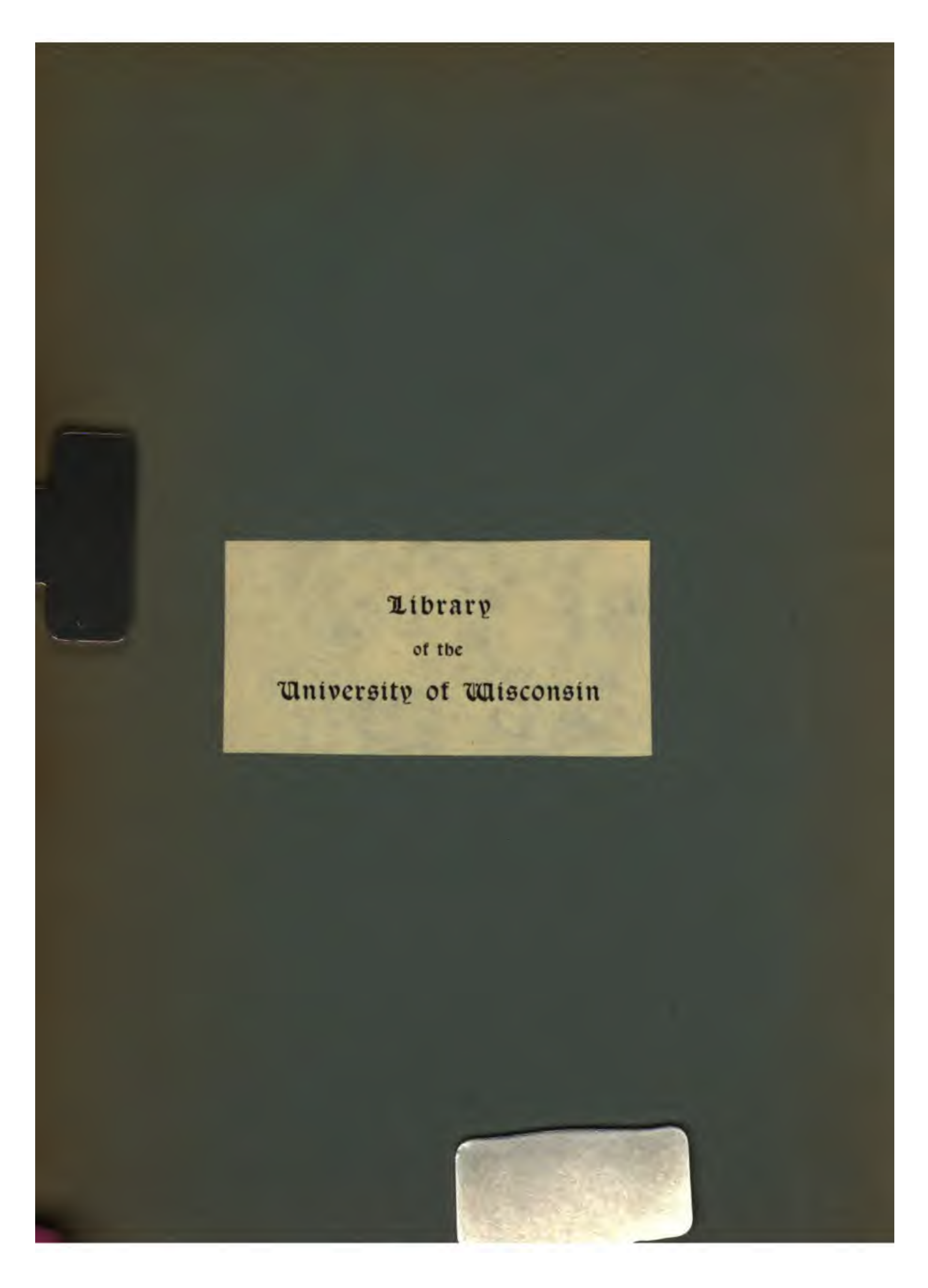

Google



Library
of the
University of Wisconsin

LES

CHEMINS DE FER

ÉLECTRIQUES

LES

CHEMINS DE FER

ÉLECTRIQUES

DISPOSITIONS GÉNÉRALES — PRODUCTION DE L'ÉLECTRICITÉ
VOIE — DISTRIBUTION DE L'ÉLECTRICITÉ
ALIMENTATION DES LIGNES — MOTEURS — TRACTION — AUTOMOTRICES
LOCOMOTIVES
CHEMINS DE FER DIVERS — EXPLOITATION ET DÉPENSES

PAR

HENRI MARÉCHAL
Ingénieur des Ponts et Chaussées.

AVEC 516 FIGURES DANS LE TEXTE

PARIS
LIBRAIRIE POLYTECHNIQUE, CH. BÉRANGER, ÉDITEUR
SUCCESSEUR DE BAUDRY ET Cie
15, RUE DES SAINTS-PÈRES, 15
MAISON A LIÈGE, 21, RUE DE LA RÉGENCE

1904

DU MÊME AUTEUR

Les Tramways électriques. — Deuxième édition, un volume in-8° avec 188 figures dans le texte. . . . . 10 fr.

PRÉFACE

Il y a quelques années à peine, il eût été difficile, sinon impossible, d'écrire un ouvrage de quelque importance sur *les Chemins de fer électriques*. Ce n'est pas que, déjà, l'on ne se fût rendu compte des avantages remarquables de l'électricité, relativement à la traction des véhicules sur rails. Mais les efforts s'étaient concentrés à peu près exclusivement sur les tramways, qui subissaient, alors, les inconvénients bien connus de la traction animale.

La supériorité du moteur électrique se manifesta d'une façon tellement éclatante, qu'en très peu de temps plusieurs milliers de kilomètres de lignes de tramways furent transformés, donnant lieu à un mouvement industriel qui comptera dans l'histoire économique de ces derniers temps.

La lutte était facile, il est vrai, pour l'électricité. Elle le fut moins, quand on songea à la mettre en parallèle avec les divers systèmes de traction mécanique qui avaient remplacé çà et là la traction animale, pour en arriver enfin aux chemins de fer eux-mêmes et à la locomotive à vapeur, si avantageuse, à certains points de vue, et qui pouvait opposer à sa jeune rivale plus d'un demi-siècle de perfectionnements incessants.

En ce qui concerne les chemins de fer, une difficulté particulière se présentait, d'ailleurs. Ceux-ci sont, en effet, constitués, le plus souvent, par des lignes de grande étendue, alors que les tramways sont concentrés dans des réseaux, ne dépassant pas les limites, naturellement assez restreintes, des agglomérations. Or, si l'on savait distribuer économiquement l'électricité à faible distance, on ne possédait pas encore de système bien pratique pour la répartir sur une très grande longueur.

Ce problème est aujourd'hui résolu. Grâce aux hautes tensions, les transports de force à 100 et même 150 kilomètres sont devenus chose courante et il n'y a pas lieu d'exiger davantage pour pouvoir envisager, avec utilité, la transformation, même de certaines grandes lignes.

A fortiori la question est-elle mûre, quand il s'agit de chemins de fer se rapprochant, par certains points, d'une ligne de tramways, comme les chemins de fer suburbains et les métropolitains.

Elle l'est également pour nombre de lignes de montagnes, qui trouvent à côté d'elles, dans les torrents et les chutes d'eau, une force abondante et gratuite pour produire l'électricité nécessaire au remorquage des trains.

On peut dire, sans exagération, qu'une phase nouvelle et décisive vient de s'ouvrir pour l'industrie des chemins de fer. Et c'est en raison du grand mouvement qui se dessine déjà d'une façon si frappante en Amérique et qui ne peut manquer de s'étendre à tous les pays, qu'il nous a paru utile d'exposer, dans quelques chapitres, la situation actuelle de la traction électrique, spécialement au point de vue des chemins de fer.

Après avoir passé en revue les principes généraux qui carac-

térisent les chemins de fer électriques, nous montrons comment, pour ce cas particulier, l'électricité peut être le plus convenablement engendrée. La circulation du courant dans les voies, sa distribution le long des lignes et l'alimentation de celles-ci, avec ou sans transformation, font ensuite l'objet d'un examen détaillé et dont l'importance se justifie par la grande variété des solutions aujourd'hui possibles. Puis le moteur électrique lui-même, base de tout système, est étudié dans son fonctionnement individuel, ce qui permet d'établir son aptitude si remarquable à la traction des trains. Le problème spécial de la traction est ensuite envisagé sous la forme nouvelle qu'il présente avec les chemins de fer électriques. Enfin l'examen du matériel roulant : automotrices, locomotives, chemins de fer divers (crémaillères, monorails, etc.) complété par quelques considérations sur l'exploitation et les dépenses montre comment, dans la pratique, on a déjà tiré parti des avantages si nombreux et si précieux des moteurs.

Pour mener à bien notre travail nous avons eu souvent recours à l'obligeance d'un grand nombre de maisons de construction soit françaises, soit étrangères. Qu'elles nous permettent de leur adresser nos remerciements. Nos excellentes revues[1] et celles qui, comme le *Street Railway Journal*, concourent si brillamment à la diffusion des idées et des méthodes américaines, ont été mises également à contribution et nous ont grandement facilité notre tâche. Enfin nous avons trouvé dans le personnel des Compagnies, où la traction électrique a déjà acquis droit de cité, autant de compétence que d'amabilité,

[1] Citons, en particulier, la *Revue générale des Chemins de fer*, le *Génie civil*, l'*Eclairage électrique*, l'*Industrie électrique*, l'*Électricien*, etc.

quand nous avons désiré examiner, par nous-même, les installations principales dont il est fait mention dans cet ouvrage. C'est un heureux présage, pour les grandes transformations qui se préparent, que de voir tant d'ingénieurs distingués suivre, avec un soin aussi attentif et aussi éclairé, les progrès répétés que réalise, à pas de géant, cette branche nouvelle et si importante de la traction électrique.

LES
CHEMINS DE FER ÉLECTRIQUES

CHAPITRE PREMIER

DISPOSITIONS GÉNÉRALES DES CHEMINS DE FER ÉLECTRIQUES

Traction par locomotives électriques. Traction par voitures automotrices. Alimentation des moteurs électriques. Courants employés pour la traction des chemins de fer : *a*) Courants continus; *b*) Courants alternatifs. Hautes et basses tensions. Fréquences. Alimentation des lignes de distribution : *a*) Lignes à courants continus; *b*) Lignes à courants alternatifs. Application des divers systèmes.

Traction par locomotives électriques. — Lorsque, par suite des progrès de l'industrie électrique, on a songé à appliquer l'électricité à la traction des chemins de fer, l'idée première devait être, naturellement, de remplacer la locomotive ordinaire par une *locomotive électrique* (fig. 1).

Dans la locomotive électrique, l'organe moteur est le *moteur électrique*, appareil dans lequel le mouvement est produit par la rotation d'un *induit* (fig. 2), tournant sous l'influence d'un champ magnétique que créent des *inducteurs*.

En général, et afin de pouvoir utiliser tout le poids adhérent de la locomotive, on rend chaque essieu moteur, en prenant autant de moteurs qu'il y a d'essieux.

Quant à la transmission même du mouvement, elle se réalise le plus souvent par l'intermédiaire d'engrenages (fig. 3). Ces engrenages sont nécessaires, parce que les moteurs les plus usuels tournent, ordinairement, à une vitesse supérieure à celle

que les roues ont à développer, à l'allure normale. Mais on a pu combiner des moteurs à allure lente, pour lesquels une transmis-



Fig. 1. — Locomotive électrique.

sion n'est plus indispensable. Dans ce cas, l'induit est monté

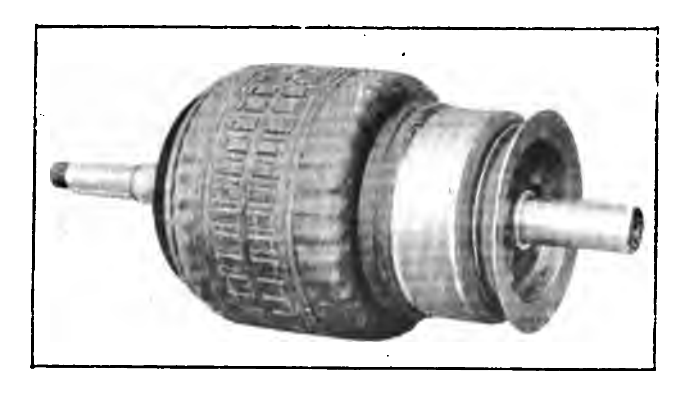


Fig. 2. — Induit de moteur électrique.

concentriquement sur l'essieu et il le fait tourner en même temps que lui.

Parfois l'induit agit non sur l'essieu lui-même, mais sur les raies ou sur la jante des roues, en les attaquant par des attaches

élastiques. Cette disposition permet au moteur de mieux supporter les chocs occasionnés par les inégalités de la voie, en même temps que le démarrage s'effectue avec plus de douceur.

Il est à remarquer que le mouvement produit par les moteurs électriques est circulaire ; c'est un premier avantage sur la locomotive à vapeur où, par suite du jeu des pistons, le mouvement

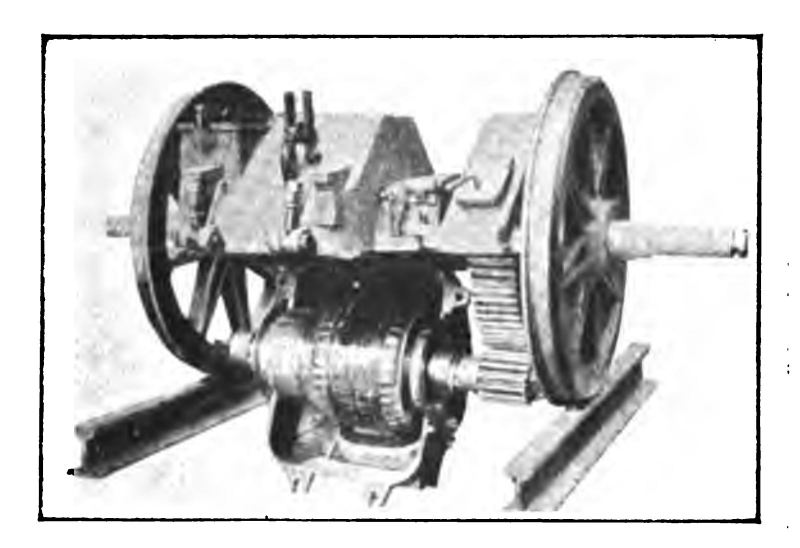


Fig. 3. — Moteur électrique ouvert.

est alternatif. On évite ainsi les mouvements de lacet, dont les voyageurs ne sont pas seuls à souffrir, mais qui ont une fâcheuse répercussion sur la voie et sur le matériel.

Il y a lieu de rappeler, en outre, que la traction électrique comporte une suppression radicale des fumées et des escarbilles. Cette particularité n'est pas seulement précieuse pour la traction des trains dans les tunnels. Si l'on réfléchit aux dépenses spéciales d'entretien qu'occasionnent les escarbilles (locomotives, paliers, organes en mouvement, intérieur et extérieur des wagons, etc.) et aux ennuis qui en résultent pour les voyageurs et les riverains,

on peut dire que, dans bien des cas, cet avantage spécial suffirait à lui seul, pour motiver le remplacement de la traction à vapeur par la traction électrique. Nous ne citons d'autre part, que pour mémoire, les incendies que provoquent souvent, le long des voies, les locomotives à vapeur, bien que, de ce chef, les Compa-

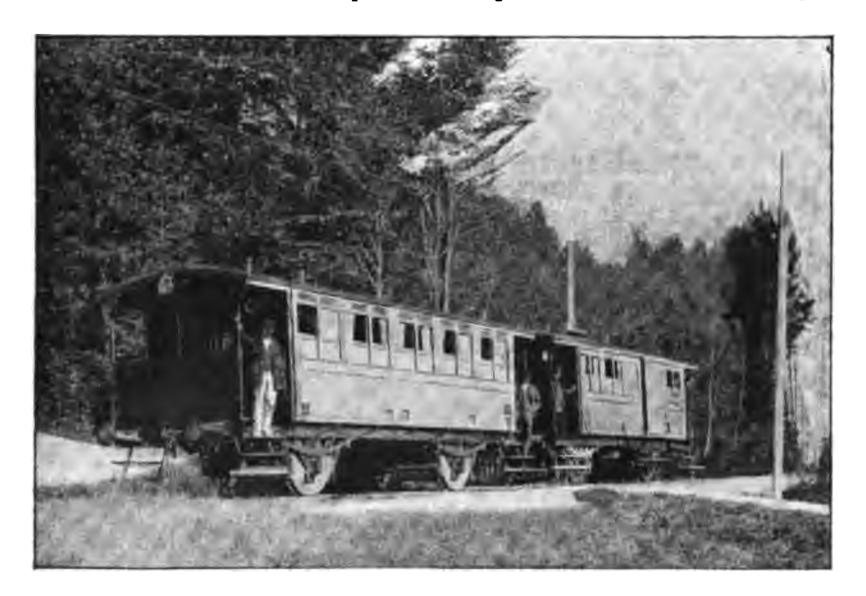


Fig. 4. — Traction par voiture automotrice.

gnies exploitantes aient eu parfois à payer des indemnités considérables. Il est clair, qu'avec l'électricité, cette source de dommages est radicalement supprimée.

Traction par voitures automotrices. — L'inconvénient de la locomotive, c'est son *poids mort*. A la vérité il faut, pour les trains lourds, qu'une locomotive soit pesante, car, sans cela, elle patinerait, au lieu de démarrer. Mais il n'en est pas moins vrai que le poids de la machine vient s'ajouter inutilement à celui du train et que les dépenses de traction s'en trouvent augmentées.

On pourrait l'éviter en montant les moteurs sur les essieux de l'une des voitures, solution que rendent possible, d'ailleurs, le faible encombrement des moteurs et le fait que ceux-ci ne sont pas des machines à feu.

Ainsi est-on arrivé à la conception de la *voiture automotrice* (fig. 4). Mais l'effort de traction d'une automotrice a, comme limite,

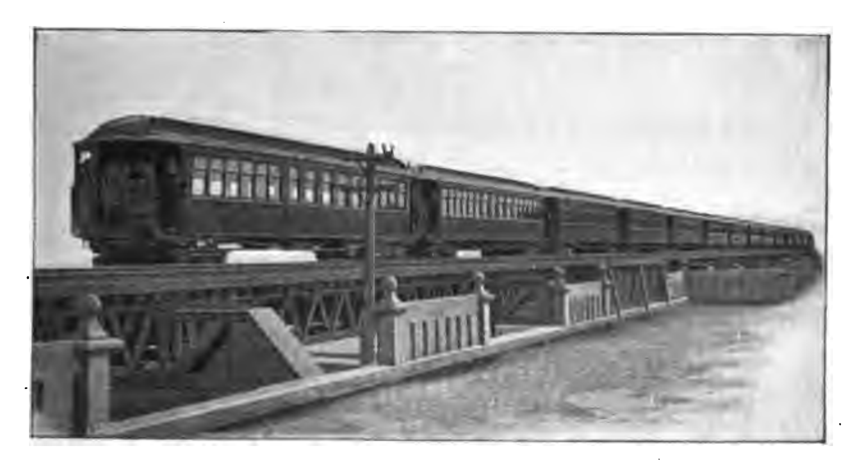


Fig. 5. — Train dont toutes les voitures sont automotrices (multiple unit system).

l'adhérence de la voiture, c'est-à-dire environ le septième de son poids. Si l'on suppose, par suite, une voiture de 20 tonnes, l'effort de traction que l'on pourra développer sera, au plus, de $\frac{20 \text{ tonnes}}{7} = 2{,}9$ t. soit près du tiers de celui que l'on obtiendrait avec des locomotives. Ce serait très souvent insuffisant, surtout si l'on a en vue des démarrages rapides.

Aussi, pour augmenter l'effort de traction a-t-on, parfois, rendu automotrices non pas une, mais deux voitures du train.

Enfin, étendant le système, on est arrivé à combiner des trains dans lesquels toutes les voitures sont automotrices (*multiple unit system*) (fig. 5). On utilise, alors, l'adhérence entière du train. Chaque voiture n'exige pas une manœuvre spéciale. On

commande l'ensemble des moteurs, à partir de la première voiture, soit par une distribution électrique (Sprague, Thomson-Houston), soit par l'air comprimé (Westinghouse).

Le *multiple unit system* offre cet autre avantage de permettre, pour ainsi dire à volonté, la subdivision des trains. Chaque voiture motrice possède, en effet, un appareil de manœuvre pour la commande générale et simultanée des voitures. Quand une voiture est simplement incorporée dans un train, cet appareil n'est pas utilisé, la première voiture intervenant seule. Mais si l'on coupe le train et que la voiture considérée passe en tête, elle est toute disposée pour permettre la manœuvre des voitures qui viennent après elle.

De cette façon, on peut faire varier très facilement le nombre des places offertes, ce qui a son intérêt sur les lignes à voyageurs où le trafic journalier subit des oscillations importantes.

Alimentation des moteurs électriques. — Quel que soit le système adopté — locomotives ou automotrices, — il faut que les moteurs soient reliés, même pendant le déplacement, à une source continue d'électricité.

On a adopté, pour réaliser cette alimentation continue, l'une des dispositions ci-après :

1° *Traction par accumulateurs*. — Sur un fourgon — remplaçant le tender — on installe une batterie d'accumulateurs. Cette batterie forme réservoir d'électricité et il suffit de la relier aux moteurs, pôle à pôle. Bien entendu il faut, avant le départ, procéder à la charge de la batterie et renouveler cette charge après un certain temps.

2° *Locomotive avec groupe électrogène* (fig. 6). — Sur la locomotive même ou sur un fourgon remorqué, on installe une véritable usine électrique avec chaudières, moteurs à vapeur et dynamos. Le courant ainsi produit alimente directement les moteurs élec-

triques (locomotive Heilmann). La complication d'un tel système est grande puisque, pour fabriquer du courant, il faut déjà des

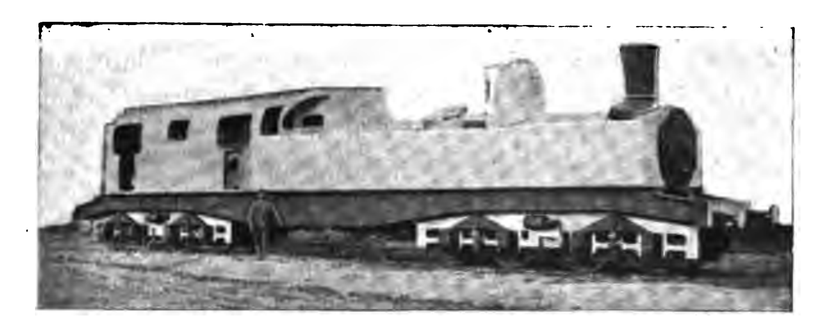


Fig. 6. — Locomotive avec groupe électrogène (locomotive Heilmann.)

organes et des appareils plus nombreux que n'en comporte une locomotive à vapeur.

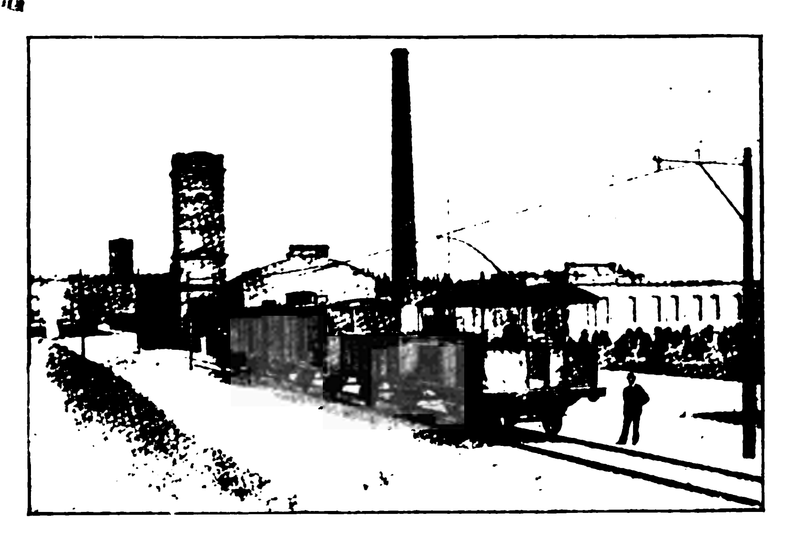


Fig. 7. — Train avec conducteurs aériens et prise de courant par trolley.

3° *Captation du courant sur un conducteur en charge régnant le long des voies.* — C'est, de beaucoup, le système le plus usité.

Le courant électrique va du conducteur aux moteurs par un frotteur, un archet ou un trolley et revient à l'usine génératrice par les rails de roulement.

L'expérience a montré que l'éclissage mécanique de ces derniers n'était pas suffisant pour assurer une continuité convenable du circuit de retour et l'on doit, dans ce système, éclisser les rails électriquement. C'est-à-dire que l'on relie les rails entre



Fig. 8. — Train avec conducteurs aériens et prise de courant par archet.

eux par des câbles ou des tiges de cuivre, de manière à ce que le courant puisse, sans difficulté, passer d'un rail à l'autre.

Le conducteur peut être, comme dans le cas d'un tramway, constitué par un fil de cuivre, régnant au-dessus ou sur le côté des voies, le courant, étant recueilli alors, soit par un trolley (fig. 7), soit par un archet (fig. 8).

Mais, comme la plate-forme d'un chemin de fer est généralement inaccessible au public, on a très souvent pris, pour conducteur, un *troisième rail*, supporté par des isolateurs et placé soit dans l'entre-voie, soit sur le côté des voies. Ce rail doit, bien entendu, être éclissé électriquement.

Dans certains cas (distribution à courants triphasés) deux conducteurs sont nécessaires. Il faut alors deux frotteurs, deux trolleys ou deux archets. En même temps, des dispositions spéciales doivent être prises aux croisements et aux aiguillages.

Il en serait de même, si l'on voulait faire revenir le courant non par les rails, mais par un conducteur spécial. Cette disposition, qui a été parfois imposée pour des réseaux de tramways, où l'on redoutait les phénomènes électrolytiques que peuvent occasionner les courants de retour, n'est guère à prévoir pour un chemin de fer muni d'une plate-forme indépendante et où les éclissages électriques des joints peuvent toujours être bien mieux surveillés que dans le cas d'une voie, avec rails noyés dans une chaussée.

Courants employés pour la traction des chemins de fer : a) *Courants continus.* — La traction des tramways ayant mis en évidence les avantages spéciaux à l'emploi du courant continu à 5 ou 600 volts, c'est à une distribution de cette nature que l'on a eu le plus souvent recours.

Les moteurs à 5 ou 600 volts sont, d'ailleurs, de fabrication courante. D'autre part, l'emploi du courant continu à la tension de 5 à 600 volts, au lieu de celle de 100 à 110 volts, qui est usuelle pour des distributions d'éclairage, permet d'adopter, pour la distribution de l'électricité, des conducteurs d'assez faible diamètre. Cependant, quand il s'agit d'un chemin de fer, la distribution électrique offre des difficultés que ne présente pas une exploitation de tramways.

D'abord, il faut se rappeler que lorsqu'un courant d'intensité I passe dans un conducteur de résistance électrique R, il se produit une perte de tension égale à RI et une perte d'énergie égale à RI^2 [1]. Dans le cas du tramway chaque voiture consomme, en moyenne, de 20 à 25 ampères et, même avec des fils de trolley

[1] L'intensité d'un courant est la quantité d'électricité que ce courant transporte en une seconde. On la mesure en *ampères*.

On compare souvent l'écoulement de l'électricité à celui de l'eau. L'ampère a son analogue dans le *débit*.

Le *volt* mesure la différence de potentiel électrique entre deux corps. C'est l'équivalent de la hauteur de chute, dans le cas de l'écoulement de l'eau. Dans le

dont le diamètre n'est que de 9 millimètres et la résistance par kilomètre de 0,25 ohm, les deux facteurs ci-dessus ne prennent, que dans de grands réseaux, une importance considérable.

Sur un chemin de fer, deux éléments interviennent pour accroître RI et RI^2 ; d'abord la longueur des lignes. qui augmente R ; ensuite



Fig. 9. — Train avec troisième rail et prise de courant par frotteurs.

le débit, qui est facilement dix fois plus fort que dans le cas d'un tramway.

L'inconvénient, c'est qu'au lieu d'une tension de 5 à 600 volts,

langage courant on assimile la différence de potentiel à une *tension ;* on dit la *tension d'un courant* et on la mesure en volts.

En multipliant la hauteur de chute par le débit on obtient, s'il s'agit d'un courant d'eau. la puissance de la chute.

De même, en multipliant l'intensité d'un courant électrique (en ampères) par sa tension (en volts). on obtient la puissance du courant. Cette puissance se chiffre en *watts*, le watt étant le produit d'un ampère par un volt.

On sait que, lorsque de l'eau circule dans un tuyau, elle éprouve, par suite de son frottement sur les parois, une certaine résistance à son mouvement. Les conducteurs, dans lesquels circule l'électricité. créent, de même, une certaine résistance au passage du courant. Cette résistance se mesure en *ohms*, l'ohm étant l'unité de résistance.

La résistance électrique varie beaucoup avec la nature du conducteur. Certaines substances comme le cuivre et l'argent ont une résistance très faible. D'autres, au contraire, comme le verre et la porcelaine, ont une résistance très considérable. C'est ce que l'on appelle des *isolants*. Pratiquement ils ne donnent passage à aucun courant.

on arrive à avoir, à une distance assez rapprochée de l'usine, une tension très affaiblie; ensuite la perte d'énergie atteint une valeur très élevée, au détriment du rendement économique de la distribution.

On peut, il est vrai, diminuer R en augmentant la section du conducteur. Mais alors celui-ci devient pesant et sa suspension,

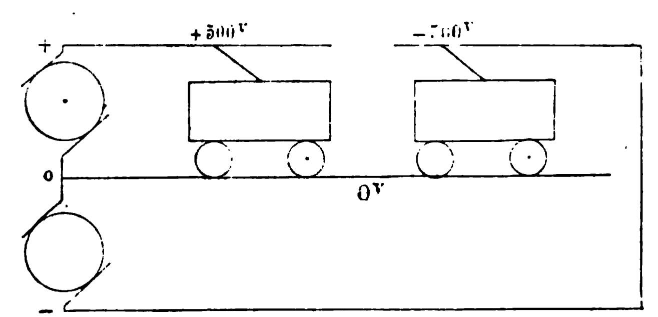


Fig. 10. — Distribution à trois fils.

s'il s'agit d'un conducteur aérien, exige des supports robustes et rapprochés. C'est une vraie charpente aérienne qu'il faut combiner (Baltimore).

L'emploi d'un troisième rail supprime cette difficulté; mais il ne faut pas oublier, dans ce cas, que le métal employé (acier) est beaucoup moins conducteur que le cuivre (environ 10 à 12 fois moins).

Si l'on augmentait la tension, on diminuerait le débit et par suite les deux facteurs RI et RI^2. Mais on avait considéré, jusque dans ces derniers temps, qu'avec des courants continus il était trop dangereux de dépasser des tensions de 5 à 600 volts. Or l'expérience prouve que l'on peut, sans inconvénient, pousser la tension jusqu'à 700 volts (New-York, Berlin) et même 750 volts. On pourra donc, dans une distribution pour chemin de fer, admettre une telle tension limite [1].

[1] Une tension supérieure ne serait pas seulement dangereuse pour le personnel ;

La *distribution à trois fils* permet de doubler la tension de distribution, tout en ne laissant pénétrer dans les voitures que du courant à la tension-limite admise. Le principe en est indiqué par la figure 10. Soient deux dynamos produisant chacune du courant à 500 volts. Montons-les en « série », c'est-à-dire réunissons le pôle positif de l'une au pôle négatif de l'autre. On aura entre les pôles extrêmes une différence de potentiel de 2 × 500 volts = 1 000 volts et, entre chacun des pôles extrêmes et le pôle commun, une différence de potentiel de seulement 500 volts.

On applique le système à la traction des chemins de fer, par exemple à un chemin de fer à double voie, en réunissant les rails au pôle médian et en installant au-dessus de chaque voie un conducteur spécial relié, pour une voie, à l'un des pôles extrêmes et pour l'autre voie au deuxième pôle extrême.

De cette façon, bien que la distribution se fasse en réalité à 1 000 volts, il n'y a que 500 volts de différence entre les fils conducteurs et les rails et l'on retombe dans le cas d'une distribution ordinaire à 500 volts. Mais, naturellement, des dispositions doivent être prises, aux croisements et aux aiguillages, pour que les deux conducteurs aériens ne puissent se toucher. Ces dispositions sont particulièrement compliquées dans les gares un peu importantes et proscrivent souvent, malgré ses qualités évidentes, l'emploi du système à trois fils.

Pour un chemin de fer à simple voie, on appliquerait le système à trois fils en divisant la ligne en sections, reliées alternativement aux deux pôles extrêmes de la double génératrice.

b) *Courants alternatifs.* — Dans un courant alternatif, la tension e est variable et de la forme :

$$e = E \sin 2\pi \frac{t}{T}$$

mais les collecteurs usuels des moteurs ne la supporteraient qu'avec difficulté et les pertes de courant par le troisième rail deviendraient assez sensibles.

expression dans laquelle t est l'instant considéré et T la durée d'une variation complète (ce que l'on appelle la période) du courant.

La tension suit ainsi une loi sinusoïdale, partant de zéro pour croître jusqu'au maximum E, puis décroissant jusqu'à zéro, devenant négative, avec un maximum négatif E et revenant à zéro, pour repasser ensuite par les mêmes phases (fig. 11). Ces variations se font très rapidement, le nombre de périodes par seconde atteignant souvent 50 à 60. Pour des raisons spéciales, que nous développerons ultérieurement, on a été conduit à abaisser sensiblement le nombre de périodes. Nous verrons beaucoup d'installations fonctionnant avec 25 périodes. Dans certains cas on est même descendu jusqu'à 15.

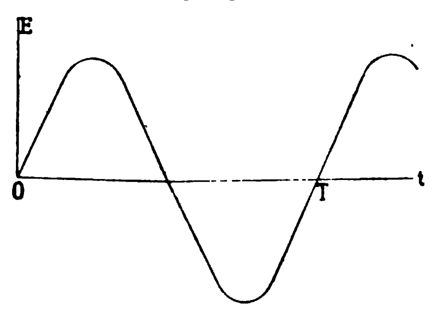


Fig. 11. — Représentation graphique de la tension d'un courant alternatif.

L'expression $e = E \sin 2\pi \frac{t}{T}$ devient, en posant $\frac{2\pi}{T} = \omega$, $e = E \sin \omega t$. Or, considérons un cercle de rayon égal à E et supposons qu'un rayon OA tourne autour du centre O, avec la vitesse angulaire ω (fig. 12). Si nous comptons le temps à partir de la position OX, l'angle AOX sera égal à ωt, t étant le temps mis par le rayon mobile pour tourner de l'angle AOX. Abaissons du point A une perpendiculaire AB sur le diamètre yy' qui est lui-même perpendiculaire à OX; on aura :

$$OB = E \sin \omega t.$$

Donc OB représente, à l'instant t, la valeur du courant alternatif.

Par conséquent on obtiendra les valeurs successives de e, en

faisant tourner $OA = E$ autour de O, avec la vitesse angulaire ω et en projetant OA sur yy'.

On peut ainsi représenter le courant alternatif par un *vecteur* OA, méthode qui offre, en particulier, l'avantage de permettre de composer très facilement deux tensions alternatives de même période.

Soit, par exemple, à ajouter deux tensions alternatives auxquelles

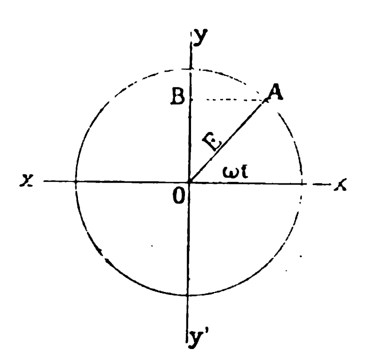


Fig. 12. — Vecteur d'un courant alternatif.

Fig. 13. — Combinaison de courants alternatifs par vecteurs.

correspondent les vecteurs OA_1 et OA_2 (fig. 13). Construisons le parallélogramme OA_1 RA_2 et projetons sur oy les trois points A_1, A_2 et R. On aura $OR_1 = OB_1 + OB_2$. Donc OR est le vecteur de la tension résultante. Et l'on obtiendra, à chaque instant, la valeur de cette tension résultante, par la rotation du vecteur et sa projection sur Oy.

Dans un circuit à tension alternative, l'intensité est également alternative ; mais, en raison de la self-induction du circuit de distribution, elle n'est pas en concordance de phase avec la tension. Si I est l'intensité maxima, on aura :

$$e = E \sin \omega t \quad \text{et} \quad i = I \sin (\omega t - \varphi).$$

Si on se reporte aux vecteurs correspondants OA et OB (fig. 14),

ce dernier sera en retard, par rapport au premier de l'angle φ, ce que l'on traduit en disant qu'il est « décalé » de l'angle φ.

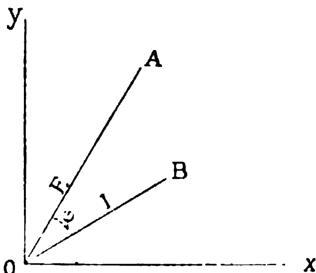


Fig. 14. — Décalage de l'intensité par rapport à la tension, dans un courant alternatif.

Il semble que, dans un courant alternatif, on devrait plutôt considérer la tension moyenne et l'intensité moyenne au lieu de E et de I[1]; mais on a été amené à partir d'une autre donnée, qui est ce que l'on appelle la *tension efficace* et l'*intensité efficace*. La raison de cette distinction, c'est que les instruments employés généralement pour la mesure des courants alternatifs donnent justement la tension efficace et l'intensité efficace. Pour passer de là à E et à I, il suffit de savoir que :

$$E \text{ effic.} = \frac{E}{\sqrt{2}} = 0{,}707 \text{ E.}$$

$$I \text{ effic.} = \frac{I}{\sqrt{2}} = 0{,}707 \text{ I.}$$

On ne doit pas oublier que lorsqu'il s'agit d'un courant alternatif la tension et l'intensité que l'on indique pour caractériser le courant, sont la tension efficace et l'intensité efficace.

Ainsi un courant alternatif de 5 000 volts est un courant dont la tension efficace est de 5 000 volts. La tension maxima serait, au contraire, $\frac{5\,000}{0{,}707} = 7\,072$ volts.

Le décalage φ de l'intensité I par rapport à la force électromotrice E intervient, dans un courant alternatif, pour réduire la puissance disponible. Alors qu'avec du courant continu cette puissance serait égale à EI elle n'est plus, pour le courant alternatif, que EI cos φ. Naturellement on devra s'arranger pour que

[1] On a d'ailleurs E moy. $= \frac{2}{\pi}$ E $= 0{,}637$ E et I moy. $= \frac{2}{\pi}$ I $= 0{,}637$ I.

cos φ soit le plus possible voisin de l'unité. Mais il est rare que, dans une distribution par courants alternatifs, cos φ soit supérieur à 0,90 et même 0,80.

Un courant alternatif simple (on dit encore monophasé) peut se distribuer avec un seul conducteur, comme dans le cas du courant continu, en prenant toutefois les rails comme second conducteur. Il joint à cet avantage celui de ne pouvoir provoquer de décompositions électrolytiques par son retour dans le sol. Mais on s'en est peu servi, jusqu'ici, parce que les moteurs à courant alternatif simple ne démarrent pas généralement sous charge. Cependant deux systèmes nouveaux de distribution par courant alternatif doivent être signalés. Le premier, préconisé par la maison Œrlikon, consiste à distribuer du courant alternatif à 15 000 volts par un fil de trolley et à s'en servir pour actionner un moteur générateur monté sur la locomotive. Ce moteur générateur, composé d'un moteur à courant alternatif et d'une dynamo à courant continu à 6 ou 700 volts, alimente, avec le courant continu produit, les moteurs de la locomotive. C'est l'équivalent d'une locomitive avec groupes électrogènes, avec cette différence que la génératrice est actionnée, non par un moteur à vapeur, mais par un moteur à courant alternatif.

Le second système employé par la Westinghouse Company repose sur l'emploi de nouveaux moteurs à courants alternatifs ayant, au point de vue du démarrage, toutes les qualités des moteurs à courant continu et offrant même cette particularité que les démarrages et les réglages de vitesse peuvent être obtenus sans pertes rhéostatiques. Le courant alternatif reçu directement dans les moteurs revient à l'usine par les rails.

Si l'emploi des courants alternatifs simples s'est trouvé limité jusqu'ici, pour la traction des chemins de fer, par ce fait que les moteurs à courant alternatif usuels ne démarrent pas généralement sous charge, on a pu, en revanche, créer toute une classe de moteurs qui, sous l'action combinée de plusieurs courants

alternatifs convenablement « décalés » échappent à ce sérieux inconvénient.

Les courants ainsi décalés sont ce que l'on appelle des *courants polyphasés*.

Dans la pratique on n'emploie guère que des *courants biphasés* (ensemble de deux courants décalés d'un quart de période) et des *courants triphasés* (ensemble de trois courants décalés d'un tiers de période). Et même, en matière de traction électrique, se limite-t-on presque toujours aux courants triphasés, dont la distribution exige un poids de cuivre moindre que les courants biphasés.

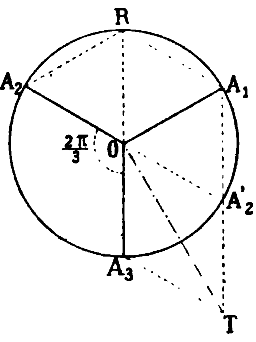


Fig. 15. — Vecteurs de courants triphasés.

Dans un courant triphasé les vecteurs représentatifs OA_1, OA_2 et OA_3 font entre eux un angle de $\frac{2\pi}{3}$ (fig. 15). On voit que la résultante OR de deux d'entre eux OA_1 et OA_2 est égale et directement opposée à OA_3. Par conséquent si l'on considère 3 conducteurs A_1, A_2, A_3 dans lesquels seront lancés des courants triphasés, on obtiendra, au point C qui les réunit tous les trois (jonction étoilée) une tension nulle (fig. 16). Donc des conducteurs de retour ne seront pas nécessaires. Par conséquent, pour distribuer des courants triphasés trois conducteurs seulement seront suffisants. En prenant les rails pour l'un d'eux on pourra même réduire à deux le nombre des conducteurs correspondant à chaque voie.

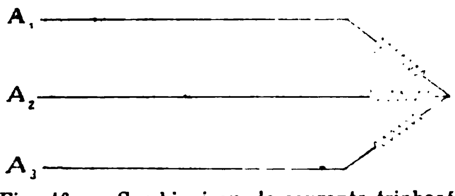


Fig. 16. — Combinaison de courants triphasés. (Jonction étoilée.)

Les locomotives ou les automotrices devront naturellement être munies de deux trolleys. De plus, comme les deux conduc-

teurs sont à des tensions différentes, il devient nécessaire d'isoler les croisements et les aiguillages.

Il faut bien remarquer, quand on a affaire à des courants triphasés, que les tensions qui se développent entre les divers conducteurs diffèrent de la tension efficace de chaque courant alternatif considéré isolément. Soit, par exemple, un courant triphasé défini par les vecteurs OA_1, OA_2, OA_3. Si l'on veut avoir la différence de tension existant entre les conducteurs parcourus respectivement par les courants OA_2 et OA_3 on prolongera OA_2 en sens contraire d'une longueur $OA'_2 = OA_2$ et l'on construira le parallélogramme OA_3 T A'_2. Le vecteur OT sera la résultante cherchée. Or, l'on a :

$$OT = OA_3 \sqrt{3}.$$

Par conséquent la différence de tension cherchée est égale à la tension du courant alternatif simple multipliée par $\sqrt{3}$. La tension ainsi considérée correspond à la *jonction en triangle*, système de montage dont nous verrons plus loin de nombreuses applications (fig. 17).

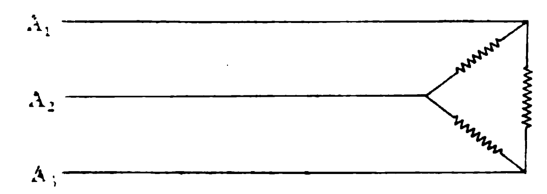


Fig. 17. — Combinaison de courants triphasés. (Jonction en triangle.)

Pour la traction sur voie ferrée on peut employer les courants triphasés de plusieurs façons.

1° Les courants circulant dans les conducteurs situés au-dessus des voies sont à basse tension (jusqu'à 700 volts) et sont reçus directement dans les moteurs des locomotives ou des automotrices (Thoune à Burgdorf) ;

2° Le courant est distribué à haute tension, mais, avant d'aller aux moteurs il passe dans des transformateurs situés sur la locomotive ou l'automotrice et qui abaissent la tension à des valeurs analogues à celles du cas précédent (Berlin à Zossen) ;

3° Le courant est distribué à haute tension et arrive directement dans cet état aux moteurs, sans passer par des transformateurs (Ligne de la Valteline).

Hautes et basses tensions. — Au début des applications de l'électricité à l'industrie on avait établi une délimitation assez nette entre les *courants à basse tension* et ceux à *haute tension*. On rangeait dans les premiers tous ceux que l'on pouvait distribuer sans aucun danger pour les personnes (jusqu'à 100 et 110 volts) et, dans les seconds, des courants que l'on produisait spécialement pour des transports de force ou pour des distributions d'énergie par transformateurs statiques et dont la tension atteignait de 2 000 à 3 000 volts.

Mais des limites aussi étroites ne pouvaient subsister longtemps et l'application à l'éclairage de la distribution à deux fils (220 volts) et de celle à 5 fils (440 volts) montra que de telles tensions étaient aussi pratiques que des tensions à 110 volts.

Enfin, quand survinrent les tramways électriques, la limite fut encore reculée et l'on fit rentrer dans les basses tensions les tensions de 5 à 600 volts auxquelles on les alimentait.

Depuis peu et par suite de l'application de l'électricité à la traction des chemins de fer, ce maximum a été encore dépassé et l'on considère, maintenant, comme rentrant dans les basses tensions, des tensions de 6 à 700 volts.

Ces tensions s'appliquent à des *courants continus*. Dès l'origine des distributions électriques on a établi, en effet, une distinction très nette entre les *courants continus* et les *courants alternatifs*, le choc produit par les premiers paraissant, à tensions égales, moins dangereux qu'avec les seconds. Alors que le courant continu agit par choc brusque, qui tend à repousser et à supprimer le contact, il se produit, avec les courants alternatifs, une crispation des muscles qui ne permet plus de lâcher les conducteurs. Mais encore faut-il, bien entendu, que cette crispation

puisse s'exercer sur le conducteur lui-même, ce qui ne peut guère arriver que si on l'a accidentellement saisi à pleines mains.

L'expérience journalière a prouvé que l'on avait exagéré notablement les dangers du courant alternatif. Il résulte même de nombreuses constatations que si, au lieu d'un choc, on envisage un contact un peu prolongé avec un conducteur électrique, le courant continu devient plus dangereux que le courant alternatif parce que, à son action physiologique, s'ajoute la décomposition du sang par électrolyse. Le courant alternatif ne produirait, dans ce cas, qu'un arrêt momentané de la vie, le cœur et les poumons ne fonctionnant plus. Et en pratiquant rapidement sur la victime la traction rythmée de la langue ainsi que le mouvement alternatif des bras, de manière à créer une sorte de respiration artificielle, on pourra la ramener à la vie, ce qui serait tout à fait impossible dans le cas du courant continu.

A notre avis il n'y a donc pas lieu d'établir une démarcation trop prononcée entre les courants continus et les courants alternatifs. Les règlements français[1] désignent sous le nom d'*installations à basse tension* les installations à courant continu utilisant des tensions inférieures ou égales à 600 volts et les installations à courants alternatifs utilisant des tensions maximum efficaces inférieures ou égales à 120 volts. Une telle limite est certainement trop basse pour les courants alternatifs.

En Suisse on admet :

a) Pour les chemins de fer et tramways établis sur un terrain public : courants alternatifs 750 volts, courants continus 1 000 volts ;

b) Pour les chemins de fer et tramways interurbains : courants alternatifs 550 volts, courants continus 750 volts.

c) Pour les chemins de fer et tramways urbains : courants alternatifs 400 volts, courants continus 600 volts.

[1] Instruction technique pour l'établissement des conducteurs d'énergie électrique (application de la loi du 25 juin 1895).

On ne voit pas pourquoi cette classification ne serait pas adoptée dans les autres pays.

En tout cas, pour un chemin de fer, on ne devra pas hésiter à envisager une tension un peu supérieure à celle qui est généralement admise pour les tramways et arriver, par exemple, aux tensions de 550 et 750 volts, prévues par le paragraphe *b*) cidessus.

Nous tenons cependant à bien faire remarquer que si l'on peut, d'après nous, étendre les limites de ce que l'on est convenu d'appeler les basses tensions, il n'en résulte pas que celles-ci doivent être considérées comme étant absolument inoffensives. Ce qu'il faut éviter, c'est qu'un contact accidentel, se produisant dans les conditions ordinaires, ne soit mortel. Or, à ce sujet, l'expérience s'est prononcée dans des milliers de cas et si la commotion n'a rien d'agréable elle est, en revanche, sans effets fâcheux persistants. Mais, dans des circonstances spéciales, par exemple quand il y a chute sur un conducteur électrisé et que la victime ne peut se dégager, les courants à basse tension — qu'ils soient continus ou alternatifs, — peuvent devenir aussi dangereux que les courants à haute tension.

Il en résulte que l'on devra toujours, même avec des basses tensions et bien que dans la plupart des cas elles soient inoffensives, observer une certaine circonspection, et avoir toujours présentes à l'esprit les mesures à prendre en cas d'accidents soit corporels, soit matériels [1].

Le domaine des hautes tensions s'est sensiblement accru dans

[1] Ces mesures ont été indiquées, d'une façon très explicite, par la circulaire du Ministre des Travaux publics, en date du 19 août 1895, que nous reproduisons ci-après.

Circulaire du 19 août 1895

Secours à donner aux personnes foudroyées par suite d'un contact accidentel avec des conducteurs électriques à courants alternatifs ou redressés.

Article premier. — Toute personne foudroyée par suite d'un contact accidentel avec des conducteurs électriques devra toujours, même dans le cas où elle présen-

ces derniers temps. Alors que l'instruction technique, à laquelle

terait les apparences de la mort, recevoir avec la plus grande rapidité, les soins indiqués ci-après :

Premier cas. — Tout contact a cessé entre le corps de la victime et les conducteurs électriques.

Art. 2. — On appliquera immédiatement le traitement suivant :

(Instructions sur les premiers soins à donner aux foudroyés victimes des accidents électriques, rédigés par l'Académie de médecine).

On transportera d'abord la victime dans un local aéré où on ne conservera qu'un petit nombre d'aides (trois ou quatre), toutes les autres personnes étant écartées.

On desserrera les vêtements de la victime et on s'efforcera le plus rapidement possible de rétablir la respiration et la circulation.

Pour rétablir la respiration, on peut avoir recours principalement aux deux moyens suivants : la traction rythmée de la langue et la respiration artificielle.

1° *Méthode de la traction rythmée de la langue.* — Ouvrir la bouche de la victime et, si les dents sont serrées, les écarter en forçant avec les doigts ou avec un corps résistant quelconque, morceau de bois, manche de couteau, dos de cuiller ou de fourchette, extrémité d'une canne.

Saisir solidement la partie antérieure de la langue entre le pouce et l'index de la main droite, nus ou revêtus d'un linge quelconque, d'un mouchoir de poche par exemple (pour empêcher le glissement) et exercer sur elle de fortes tractions répétées, successives, cadencées ou rythmées, suivies de relâchements, en imitant les mouvements rythmés de la respiration elle-même, au nombre d'au moins 20 par minute.

Les tractions linguales doivent être pratiquées sans retard et avec persistance, durant une demi-heure, une heure et plus.

2° *Méthode de la respiration artificielle.* — Coucher la victime sur le dos, les épaules légèrement soulevées, la bouche ouverte, la langue bien dégagée. Saisir les bras à la hauteur des coudes, les appuyer assez fortement sur les parois de la poitrine, puis les écarter et les porter au-dessous de la tête, en décrivant un arc de cercle ; les ramener ensuite à leur position primitive sur les parois de la poitrine.

Répéter ces mouvements environ vingt fois par minute, en continuant jusqu'au rétablissement de la respiration naturelle.

Il conviendra de commencer toujours par la méthode de la traction de la langue en appliquant, s'il est possible, la méthode de la respiration artificielle.

D'autre part, il conviendra, concurremment, de chercher à ramener la circulation en frictionnant la surface du corps, en flagellant le tronc avec les mains ou avec des serviettes mouillées, en jetant de temps en temps de l'eau froide sur la figure, en faisant respirer de l'ammoniaque et du vinaigre.

Deuxième cas. — La victime est encore en contact avec les conducteurs électriques.

Art. 3. — Avant d'appliquer le traitement indiqué par l'Académie de médecine, le sauveteur doit chercher à séparer le plus rapidement possible la victime des fils électriques, en évitant d'une manière absolue de toucher, soit les fils, soit la victime avec les mains nues.

L'accident peut se produire avec l'une des circonstances suivantes :

A. Un fil est tombé sur le sol et touche la victime.

B. La victime est suspendue.

Selon l'une ou l'autre de ces circonstances on opérera comme il est dit ci-après :

A. Un fil est tombé sur le sol et touche la victime. *Écartement des fils.* — Si le

nous avons fait allusion plus haut, prévoit, comme une sorte de

sauveteur peut, sans avoir à toucher la victime, écarter les fils à l'aide d'un bâton, d'une canne ou d'un outil quelconque muni d'un manche en bois (note *A*) il le fera en ayant soin :

1° De ne toucher au fil qu'avec un bâton, une canne ou un outil muni d'un manche en bois (note *A*) ;

2° De faire en sorte que le fil, dans cette manœuvre ne vienne toucher le visage ou d'autres parties nues de la victime.

Si le sauveteur ne dispose pas immédiatement d'un bâton, d'une canne ou d'un outil muni d'un manche en bois (note *A*), il devra, avant tout, commencer par se couvrir les mains (note *B*), soit de gants épais (note *C*), soit d'étoffes sèches (note *D*) d'une épaisseur suffisante (note *B* et *D*). Cela fait, il écartera le fil. Après avoir délivré la victime, on s'empressera de débarrasser la voie publique, afin d'éviter de nouveaux accidents.

Coupure de fil. — Si le sauveteur ne peut écarter le fil il devra le couper à l'aide d'un outil tranchant à manche non métallique, comme une hache à manche de bois sec.

Il fera successivement deux coupures en deux points situes de part et d'autre de la victime.

Il n'est pas nécessaire de couper le fil près de la victime, il est préférable de le couper près des poteaux en suspension, de façon que les parties restant adhérentes à ces poteaux ne touchent pas le sol, ou ne le touchent que sur la plus petite longueur possible.

Pendant que l'on coupe le fil, il faut veiller à ce qu'il ne rebondisse pas et n'aille toucher ni la victime ni le sauveteur. On pourra dans ce but maintenir le fil sous le pied par intermédiaire de matières isolantes, telles que bois sec, planches, fagots, bottes de paille, vêtements secs, cordes sèches, etc... (note *B*).

Dégagement de la victime. — Si on peut effectuer les coupures des fils électriques, dans les conditions qui viennent d'être indiquées, si le sauveteur est obligé de toucher la victime et s'il y a crispation des membres de la victime, des doigts, par exemple, l'opérateur avant de rien faire devra commencer par se recouvrir les deux mains soit de gants (note *C*), soit d'étoffes sèches d'une épaisseur suffisante (note *B* et *D*).

Puis il ouvrira de force la ou les mains de la victime en écartant les doigts les uns après les autres.

Pendant cette opération :

1° Avoir soin que le fil ne revienne pas toucher le visage ou d'autres parties nues du corps de la victime ;

2° Toucher autant que possible la victime par des parties qui ne soient pas en état de moiteur, telles que les aisselles, les pieds, etc.

B. La victime est suspendue. — Prévoir sa chute et prendre à cet effet les précautions convenables. A l'aide d'une échelle ou de tout autre moyen, on tâchera de s'élever jusqu'à la victime et de la délivrer en coupant le fil.

Le seul instrument convenable dans ce cas pour couper le fil est une cisaille, mais comme le manche est généralement métallique, il faudra avant d'employer cet outil, ou bien se couvrir les deux mains comme il est expliqué à l'article 3, ou bien entourer le manche de l'instrument d'une épaisseur suffisante d'étoffes sèches (note *D*).

Quand on aura atteint la victime, on la suspendra par des cordes ou on l'accro-

maximum, la tension de 10 000 volts et stipule que les demandes concernant l'usage de tensions supérieures sont réservées à l'examen et à la décision de l'administration supérieure, on emploie à l'étranger, d'une façon courante, des tensions de 15 à 20 000 volts. On a même eu recours, dans certains cas, à des ten-

chera par ses vêtements et on la descendra en évitant qu'elle soit mise de nouveau en contact avec les fils.

Si on ne dispose d'aucun moyen pour arriver à la victime ou si, disposant d'une échelle, on ne possède pas un instrument convenable pour couper le fil ou opérer comme il vient d'être expliqué, on devra prévenir l'usine le plus vite possible.

AVIS IMPORTANT

ART. 4. — Dans aucun cas le sauveteur ne doit toucher un fil sans s'être recouvert les deux mains, soit de gants épais (note *C*), soit d'étoffes sèches d'une épaisseur suffisante (note *B* et *D*) ; si des rails sont placés sur la voie publique il doit éviter de les toucher, même avec ses chaussures.

Même les deux mains étant recouvertes conformément aux prescriptions, le sauveteur ne doit dans aucun cas toucher simultanément deux fils différents, et il doit s'abstenir de toute manœuvre qui mettrait la victime en contact avec deux fils différents.

Les personnes étrangères au service, à moins d'être très exercées aux maniements des fils et appareils électriques et d'en connaître toutes les causes de danger, ne doivent en aucun cas chercher à établir un court-circuit. Cette opération ne peut être faite utilement et sans danger que par des personnes compétentes.

En se conformant strictement aux précautions indiquées ci-dessus, le sauveteur ne court aucun risque quand bien même il ressentirait accidentellement quelques secousses.

Note A. — Le bois est conseillé parce qu'il est mauvais conducteur de l'électricité et intervient comme corps isolant; si le manche en bois renferme une tige centrale métallique, il est nécessaire que cette tige soit complètement enveloppée de bois et n'apparaisse sur aucun point.

Note B. — Il suffira souvent de retirer sa veste, son paletot, etc., et de le mettre sens devant derrière, les mains restant à l'intérieur des manches qui devront être tamponnées pour former une forte épaisseur entre la peau et le contact à faire.

Si on a une blouse on se l'enroulera autour de la main droite, et autour de la main gauche on enroulera un mouchoir, un gilet, etc...

Note C. — Gants en laine compacte, de préférence genre moufle, au besoin plusieurs paires de gants.

Note D. — RENSEIGNEMENTS SUR LA VALEUR ISOLANTE DES ÉTOFFES ET DES VÊTEMENTS.

Etoffes. — Les étoffes à employer doivent être bien sèches; les plus convenables sont celles en laine; la flanelle et les couvertures en laine sont particulièrement convenables.

Les étoffes en fil, en coton, sont moins convenables surtout en raison de leur faible épaisseur; avec une épaisseur minimum de 5 millimètres on a toute garantie même avec les étoffes les moins convenables.

Vêtements. — Par analogie de tout ce qui vient d'être dit, il faut prendre les draps en laine compacte de préférence, et, dans le cas d'emploi de blouses de coton ou de toile, s'arranger pour avoir largement l'épaisseur minimum indiquee.

sions de 50 à 60 000 volts[1]. Il est clair que de telles tensions facilitent considérablement les transports de force, même à très longue distance (150 à 200 kilomètres). En revanche, des précautions sérieuses doivent être prises pour assurer l'isolement et la protection des conducteurs. Les nombreuses installations avec hautes tensions faites dans ces dernières années démontrent que ces difficultés peuvent être toujours résolues et que, en définitive, les hautes tensions, employées directement ou indirectement, sont parfaitement compatibles avec les exigences si diverses d'un service public de transport.

Évidemment les hautes tensions ne devront être recherchées que si elles sont nécessaires pour la distribution que l'on a en vue. D'ailleurs, certaines considérations peuvent intervenir pour les limiter, notamment celles des canalisations. Si, par exemple, on doit effectuer la distribution de l'énergie par des *câbles isolés*, on ne pourra guère dépasser 15 000 volts, les câbles usuels étant déjà très coûteux pour 10 000 volts et nécessitant, pour des tensions supérieures, des épaisseurs d'isolant qui rendent le câble peu maniable.

S'il s'agit de *câbles nus sur isolateurs* il n'y a plus de difficulté, les constructeurs livrant couramment des isolateurs qui peuvent supporter de 50 à 60 000 volts.

Avec de très hautes tensions, la distinction entre courants continus et courants alternatifs n'a plus grand intérêt. Dans ces dernières années les hautes tensions ont été plutôt l'apanage des courants alternatifs. Mais cela tient surtout à ce que les courants alternatifs peuvent être obtenus facilement à des tensions très élevées, soit que l'on ait recours à des machines à haute tension (jusqu'à 20 000 volts) soit que l'on fabrique des courants alternatifs à tension relativement basse et que l'on relève celle-ci avec des transformateurs statiques.

[1] La Missouri River Company vient d'effectuer un transport de force à 104 kilomètres avec une tension de 50 000 volts.

Les dynamos à courant continu donnent, au maximum, de 3 à 4 000 volts; si l'on voulait augmenter cette tension il faudrait recevoir le courant dans une autre dynamo, qui ajouterait sa propre tension à celle du courant et rendrait ce dernier à une tension double. C'est là ce que l'on appelle *monter les dynamos en série* et l'on conçoit qu'en prenant un assez grand nombre de dynamos on pourrait arriver jusqu'à 30 et 40 000 volts. Il n'est donc pas impossible d'envisager la production et la distribution de courants continus à de très hautes tensions. M. Thury, qui préconise ce système, fait même observer que la distribution de l'électricité est, dans ce cas, beaucoup plus simple, car elle peut être faite par un circuit en boucle sur lequel les récepteurs seront également montés en série et qui ne nécessitera, par suite, qu'un seul fil. On évite ainsi les courts circuits que produisent si souvent, sur les lignes triphasées, les branches d'arbres tombant accidentellement sur les fils.

Fréquences. — Dans une distribution par courants alternatifs il y a lieu de considérer, comme nous l'avons déjà fait remarquer, non seulement la tension du courant, mais aussi sa fréquence, c'est-à-dire le nombre de périodes par seconde. On peut fabriquer des courants alternatifs à fréquence extrêmement élevée. M. d'Arsonval, qui a spécialement étudié les courants à haute tension et à fréquence élevée, a montré combien ces courants différaient de ceux qui sont employés dans les applications ordinaires de l'électricité à la traction[1]. Alors que M. d'Arsonval utilise des courants dont le nombre de périodes par seconde s'élève facilement à plusieurs millions, on atteint rarement, pour l'alimentation des chemins de fer et des tramways, 50 à 60 périodes. Une fréquence aussi élevée est même aujourd'hui à peu près délaissée. On la

[1] Il n'en résulte pas que les courants à haute fréquence ne pourront être utilisés, un jour, pour la traction. Il est au contraire parfaitement possible qu'ils donnent une solution extrêmement intéressante de la traction sur voie ferree, combinée avec e transport de l'énergie à très longue distance.

justifiait, autrefois, par des raisons d'ordre spécial comme, par exemple, la nécessité d'employer une partie du courant à l'éclairage (wagons, gares, voie, etc.). Mais d'abord l'expérience a prouvé que, même avec du courant à 25 périodes, on pouvait alimenter convenablement des lampes à incandescence et même des lampes à arcs. La diminution de la fréquence, qui présente des avantages sérieux au point de vue de la production dans les usines, de la distribution et de la transformation a donc pu être avantageusement réalisée. Aussi rencontre-t-on la fréquence 25 dans un grand nombre d'installations où l'énergie est produite initialement sous forme de courants alternatifs (Métropolitain de Paris, Chemin de fer de l'Ouest, Elevated de New-York, etc.). Mais on a souvent intérêt à descendre encore plus bas et nous verrons que, pour un certain nombre de lignes, on a eu recours à des fréquences de 15 à 16. A cette fréquence, les lampes à arc ne fonctionnent plus du tout et les lampes à incandescence usuelles ne donnent qu'une lumière vacillante. Il faut donc alimenter autrement les circuits d'éclairage. Toutefois certaines lampes à incandescence à bas voltage ont une inertie calorifique telle, qu'elles donnent encore l'impression d'une source lumineuse à intensité constante. Mais, en raison de leur bas voltage, on ne peut les employer que montées en série.

Alimentation des lignes de distribution. — a) *Lignes à courant continu.* — Si la ligne est peu étendue et que l'on puisse installer l'usine à proximité, il suffira de déverser directement le courant de l'usine dans la ligne, en reliant le conducteur au pôle positif du tableau et les rails au pôle négatif (Berlin).

Mais une distribution aussi simple n'est possible que dans des cas très limités, car la grande consommation d'électricité que font les chemins de fer entraîne, dans les conducteurs de distribution, des pertes de charge rapides. Si l'on considère, par exemple, une ligne de 4 kilomètres de longueur, avec quatre

trains en service consommant chacun, en moyenne, 200 ampères et que l'on suppose l'électricité distribuée par un rail isolé pesant 40 kilogrammes au mètre courant, la perte de tension à l'extrémité du rail sera de 60 volts et la perte d'énergie, par an, atteindra 237000 kilowatts-heure, soit une dépense de 28440 fr., en comptant l'électricité à 0,12 fr. seulement le kilowatt-heure.

Le double inconvénient dû aux pertes de tension peut donc devenir facilement très sensible.

Pour l'atténuer on reliera l'usine à la ligne, non pas seulement en un seul point, mais à plusieurs convenablement choisis, d'après le profil en long, par des *feeders*. Ceux-ci ne sont autres que des conducteurs spéciaux, n'effectuant aucun service en cours de route et jouant exclusivement le rôle d'alimentateurs. On peut constituer les feeders soit par des câbles, soit par des rails isolés (Chicago), sauf le cas d'une voie trop encombrée. Les feeders partent du tableau de distribution de l'usine où il sont commandés généralement par un interrupteur automatique qui coupe le courant dès que son débit devient excessif, ce qui peut arriver, par exemple, au moment d'un court circuit sur la voie. Il est bon également, pour faciliter les réparations, d'avoir un interrupteur à la jonction du feeder et du rail de distribution, afin de pouvoir, en cas de réparation, isoler complètement le feeder.

Si, dans une distribution, l'énergie électrique est à bon marché et que, par suite, la préoccupation dominante soit d'assurer une bonne répartition de la tension sur la ligne, on peut employer des feeders de petite section à la condition d'installer sur leur trajet des *survolteurs* (chemin de fer de Grenoble à Chapareillan). Un survolteur n'est autre qu'un moteur électrique actionnant une dynamo génératrice que traverse le courant du feeder et qui ajoute sa propre tension à celle de ce dernier. Si, par exemple, on perd 100 volts dans le feeder, la dynamo aura elle-même une force électro-motrice de 100 volts et l'alimentation se fera, par suite, au voltage de l'usine. Si R est la résistance du feeder, la

perte de tension qu'il occasionne est égale à RI, I, étant le débit. Or I est variable; la perte de tension est donc elle-même variable. Pour obtenir que la force électromotrice de la dynamo survolteuse varie en proportion, on doit prendre quelques dispositions sur le détail desquels nous reviendrons ultérieurement.

Des feeders sont généralement nécessaires non seulement pour l'*aller* du courant, mais aussi pour le *retour;* mais il y a lieu de faire intervenir, pour leur calcul, la moins grande résistance de la voie, puisque celle-ci comporte deux rails, au lieu du rail unique par lequel nous avons supposé le courant distribué.

Nous avons déjà appelé l'attention sur les phénomènes électrolytiques que peuvent occasionner les courants de retour, phénomènes dont la conséquence est l'attaque des conduites d'eau ou de gaz situées à proximité de la ligne. Évidemment ces phénomènes sont moins à craindre que dans le cas d'un tramway, en raison de l'établissement des chemins de fer sur une plateforme spéciale. Mais il peut très bien arriver qu'un chemin de fer, sur une partie de son parcours, (par exemple un chemin de fer d'intérêt local) ait à emprunter des voies publiques. On rentrera alors dans le cas ordinaire des tramways et il deviendra nécessaire d'apporter une grande attention à la circulation du courant de retour. A ce sujet et comme corollaire de l'emploi des *survolteurs* examiné plus haut, nous signalerons l'usage qui a été fait, parfois, de *dévolteurs*. Ces appareils créent sur les feeders, à l'inverse des survolteurs, une force électromotrice négative et abaissent ainsi la différence de potentiel qui peut exister entre l'extrémité des feeders et l'usine. Or c'est cette différence de potentiel qui occasionne la décomposition électrolytique, le courant ayant, si elle est élevée, beaucoup plus de tendance à revenir à l'usine par un chemin autre que les feeders.

Une ligne à courant continu peut être alimentée par un transport de force. Mais alors une transformation s'impose, car il ne

serait pas économique d'effectuer un transport de force à 6 ou 700 volts. Il faut arriver à des tensions beaucoup plus élevées (facilement 5 000 volts). La transformation du courant s'effectue dans des *sous-stations* qui, à leur mode d'alimentation près, comportent, vis-à-vis de la ligne, le mode de fonctionnement examiné plus haut pour le cas d'une usine à 6 ou 700 volts.

Les transports de force peuvent s'effectuer par courants continus à haute tension (système Thury) ou par courants triphasés. Ces derniers de préférence aux courants biphasés, parce que, ainsi qu'il a été dit précédemment, leur emploi est plus économique.

Dans le premier cas le courant est reçu dans un moteur à haute tension actionnant une dynamo à 6 ou 700 volts. Le système Thury offre cette particularité que les dynamos réceptrices peuvent être mises en série et que, par conséquent, la tension primaire se répartit entre les diverses réceptrices qui fonctionnent alors à un voltage inférieur à celui de la ligne.

Avec un transport de force par courants triphasés la sous-station présente l'une des dispositions ci-après :

a) Le courant à haute tension actionne directement un moteur à haute tension (presque toujours un moteur à champ tournant) qui conduit une génératrice à courant continu à 6 ou 700 volts. L'ensemble de ces deux appareils est souvent désigné sous le nom de *transformateur tournant*.

b) La tension primaire est réduite par des *transformateurs statiques* et le courant est ensuite envoyé dans des *commutatrices* (ensemble d'un moteur synchrone et d'une génératrice) qui donnent, aux balais, du courant continu à 6 ou 700 volts.

b) *Lignes à courant alternatif.* — L'emploi du courant alternatif simple à haute tension préconisé par les ateliers d'Œrlikon comporte une alimentation directe de la ligne. On a pris comme tension limite 15 000 volts, parce que cette tension peut être directement produite par des alternateurs et que, d'autre part,

elle peut être directement reçue par les appareils transformateurs des locomotives. Une telle tension permet de placer l'usine même à une assez grande distance de la ligne.

Si, pour des raisons spéciales, on devait utiliser une source d'énergie exigeant, en raison de son éloignement, l'emploi de courants primaires à une tension supérieure à 15 000 volts, on devrait, sur la ligne, abaisser la tension jusqu'à 15 000 volts par des transformateurs statiques.

L'abaissement de la tension primaire se fait également par des transformateurs statiques dans le système de la Westinghouse Company. La tension secondaire étant de 1 000 volts on répartira, le long de la ligne, des postes de transformateurs qui abaisseront la tension primaire de la quantité voulue pour la ramener à 1 000 volts.

Avec des courants triphasés il faut envisager deux cas :

1° La ligne est à basse tension (de 4 à 600 volts), et comme, presque toujours, l'électricité sera fabriquée dans une usine à haute tension, convenablement placée, on abaissera la tension dans des postes de *transformateurs statiques*, échelonnés le long de la ligne;

2° La ligne est à haute tension et l'on peut se passer de transformateurs. Mais il est à remarquer que, jusqu'à ce moment, les courants triphasés directs n'ont été employés qu'à la tension maximum de 3 000 volts. Or, on est souvent amené à combiner des transports de force à 30 000, 40 000 et même 50 000 volts. Dans ce cas il faudrait avoir recours à des postes de transformateurs statiques.

Application des divers systèmes. — Bien que l'application de l'électricité à la traction des chemins de fer soit de date récente on a pu voir, par l'exposé qui précède, que déjà des systèmes de traction assez différents ont été mis en usage.

Comme il est probable que, dans un avenir prochain, d'autres

systèmes verront également le jour, il serait réellement hasardé d'indiquer quel est le système qui s'imposera définitivement pour la substitution de la traction électrique à la traction à vapeur sur les voies ferrées.

Au surplus, dans l'état actuel de nos connaissances et de l'industrie, on ne saurait avancer que l'électricité doive partout se substituer à la vapeur. C'est une question d'espèce, de même que le choix du système de traction dépend des conditions spéciales de la ligne que l'on a à transformer.

Si l'on a à électrifier une ligne de peu d'étendue ou un réseau très condensé, comme un ensemble de lignes métropolitaines, l'emploi des courants continus à 6 ou 700 volts se trouve généralement très justifié. On est excessivement familiarisé avec des courants de cette nature et la pratique des tramways a montré avec quelle facilité on pouvait les produire, les distribuer et les utiliser. Comme on le verra plus loin, les moteurs à courant continu ont une qualité précieuse : leur aptitude au démarrage, et, comme on a pu arriver à construire des moteurs qui, même au démarrage, jouissent d'un bon rendement, on ne doit pas s'étonner que sur les réseaux urbains ou suburbains, c'est-à-dire sur des lignes où il faut, tout en démarrant souvent, réaliser une vitesse commerciale élevée, on ait eu, de préférence, recours à une distribution par courants continus à 6 ou 700 volts.

Cependant, à l'occasion de la transformation de la traction sur le métropolitain de Londres, on a, avec beaucoup d'arguments, opposé aux courants continus une distribution directe par courants triphasés à haute tension. La maison Ganz, qui préconisait le système, faisait valoir que le courant serait distribué par de simples fils de trolley, ce qui supprime l'encombrement des rails conducteurs et rend la voie plus sûre pour le personnel, et que, d'autre part, les moteurs à courants triphasés peuvent restituer, à la descente des pentes et au moment des arrêts, une partie de l'énergie consommée dans les rampes ou

pour les démarrages. Malgré l'avis nettement favorable de M. William Preece, l'éminent ingénieur en chef du Post-Office, la Compagnie exploitante a préféré les courants continus, qui ont déjà fait leurs preuves à Chicago, Boston, Baltimore, Paris, etc.

Pour le cas plus général d'une ligne s'étendant sur une grande longueur, le courant continu à 5 ou 600 volts ne saurait plus être pratiquement appliqué. Il conduirait, en effet, à des pertes de tension et à des pertes d'énergie trop considérables. Il est vrai qu'en employant du courant à haute tension et en le transformant dans des sous-stations on pourrait, si l'on multipliait ces sous-stations, réaliser une distribution à peu près uniforme. Mais on ne pourrait obtenir du courant continu à 5 ou 600 volts que par l'emploi d'*appareils tournants*, qui nécessitent une surveillance assidue. En ajoutant ces frais de surveillance à ceux d'entretien et d'amortissement des sous-stations, on atteindrait des dépenses qui feraient généralement perdre tout le bénéfice que l'on peut attendre de la traction électrique.

Une distribution directe par courants alternatifs simples ou triphasés, à haute tension, serait, pour le moment, une solution beaucoup plus convenable.

A la vérité sur certains chemins de fer (exemple : Thoune à Burgdorf), tout en admettant un transport de force à haute tension on a jugé prudent d'abaisser celle-ci, avant d'envoyer le courant dans la ligne de distribution. Mais il est à remarquer que déjà une grande amélioration a été obtenue, dans cette installation, du fait même de l'emploi général du courant triphasé; car pour transformer du courant triphasé à haute tension en courants triphasés à basse tension, des *transformateurs statiques*, qui n'exigent pour ainsi dire pas de surveillance, sont seulement nécessaires.

Avec du courant à haute tension on peut se contenter pour la distribution, de simples fils de trolley. C'est, à la fois, une simplification et une grosse économie. Dans le système des

ateliers d'Œrlikon on prévoit des tensions de 15000 volts. Si, par excès de prudence, on voulait se contenter de courants à 3000 volts (comme sur les lignes du lac de Côme) ou encore à 5000 volts, selon le procédé Ganz, on pourrait n'alimenter, qu'en des points très éloignés, les conducteurs de distribution[1].

Il est d'ailleurs à remarquer que, pour cette alimentation, on pourrait faire usage de courants à tension encore plus élevée, puisque l'on arrive maintenant à effectuer des transports de force à 30000, 40000 et même 50000 volts. Avec de telles tensions, de très petits fils peuvent transmettre de grosses puissances à de très grandes distances (100 à 150 kilomètres) et l'emploi général du courant alternatif permet de passer de la tension primaire à la tension de distribution par de simples transformateurs statiques.

Si l'emploi du courant monophasé manque encore de la sanction de la pratique on peut dire, en revanche, que les courants triphasés sont maintenant suffisamment connus pour qu'une distribution de cette nature puisse être, dès à présent, envisagée dans le cas où il s'agirait d'appliquer la traction électrique à une ligne, même aussi étendue que Paris-Marseille.

D'autres solutions ne manqueront pas d'intervenir, en sorte que la grande transformation qui s'est produite il y a quelques années dans le domaine des tramways paraît devoir, très prochainement, se réaliser également dans l'industrie des chemins de fer. Certes, les conditions sont différentes et, pour beaucoup de lignes en exploitation, l'application de la traction électrique ne serait pas actuellement justifiée; mais le nombre de celles qui pourront être transformées est assez vaste pour que l'on puisse envisager, de ce chef, la création prochaine d'un mouvement scientifique et économique des plus intéressants.

[1] Des expériences récentes effectuées par la maison Siemens et Halske, sur le chemin de fer de Berlin à Zossen, et dont il sera parlé plus loin, ont montré que l'on pouvait, avec toute sécurité, effectuer de la traction directe avec 10 000 volts.

CHAPITRE II

PRODUCTION DE L'ÉLECTRICITÉ DANS LE CAS DE LA TRACTION DES CHEMINS DE FER

Conditions générales de la production de l'électricité. Génératrices : *a*) Génératrices à courant continu; *b*) Génératrices à courant alternatif. Tableau de distribution et de manœuvre. Usines hydrauliques. Usines à vapeur. Emploi de la vapeur surchauffée. Turbines à vapeur. Usines avec moteurs à gaz. Emploi des accumulateurs dans les stations centrales.

Conditions générales de la production de l'électricité. — L'électricité est produite industriellement par des génératrices électriques (appelées *dynamos*, d'une manière générale, et, plus spécialement *alternateurs*, quand le courant produit est alternatif) que mettent en mouvement des moteurs mécaniques. Évidemment, une génératrice peut être actionnée également par des moteurs électriques ; mais ces moteurs reçoivent eux-mêmes leur électricité d'une autre usine et, en remontant à la source, on trouve finalement un groupe élémentaire, comprenant un moteur mécanique et une génératrice électrique. Cet ensemble assure la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique.

Les moteurs employés dans la pratique sont :

Les moteurs hydrauliques ;

Les moteurs à vapeur ;

Les moteurs à gaz.

Les premiers sont certainement les plus simples. Ils se prêtent, de plus, admirablement à la réalisation de cette belle conception moderne de l'utilisation des forces naturelles. Mais les chutes hydrauliques importantes n'existent généralement que dans les

pays montagneux, ce qui limite beaucoup la zone d'application du système. Toutefois l'emploi de très hautes tensions (40 à 50000 volts) qui permet des transports de force à 100 et 150 kilomètres, a singulièrement élargi, dans ces dernières années, la zone d'action possible des moteurs hydrauliques.

Malgré la grande abondance des forces naturelles il ne faudrait pas croire que la génération de l'électricité, par moteurs hydrauliques, puisse s'étendre indéfiniment. Cela tient à ce qu'une chute ne peut être captée utilement que si elle présente des qualités spéciales au point de vue de la permanence, de la qualité des eaux et de sa situation géographique[1]. Aussi faut-il envisager, comme mode le plus général de génération de l'électricité, l'emploi de moteurs à vapeur.

Les moteurs à gaz constituent une classe nouvelle et très intéressante de moteurs. Leur rendement thermique est sensiblement plus satisfaisant que celui des moteurs à vapeur, mais ils comportent l'emploi de charbons spéciaux et n'ont pas encore été employés couramment, jusqu'ici, pour la production de très grandes puissances électriques. Ce sont des moteurs d'avenir mais évidemment, dans une grande installation autonome, sauf cas spéciaux, on hésiterait aujourd'hui à les substituer, d'une façon radicale, aux moteurs à vapeur, qui ont derrière eux un siècle de pratique et de perfectionnement[2].

Génératrices. a) *Génératrices à courants continus.* — La géné-

[1] Il n'est pas rare que, dans un pays de montagnes, des écarts, dans la proportion de 1 à 12, se produisent entre le débit d'un cours d'eau à l'étiage et le débit moyen. Aussi les chutes intéressantes sont-elles celles qui jouissent d'un élément régulateur, comme un lac. Mais les chutes de cette nature sont rares et c'est ce qui donne chez nous tant d'intérêt au projet d'utilisation des chutes du Rhône, à l'aval du lac de Genève.

[2] Nous spécifions bien qu'il s'agit d'une installation autonome, car certaines considérations pourront faire parfois pencher la balance en faveur des moteurs à gaz. Par exemple ceux-ci seront tout indiqués, quand on aura à sa disposition d'énormes quantités de gaz combustible, comme en produisent les fours à coke et les hauts fourneaux.

ratrice à courant continu comprend une partie fixe (*inducteurs*) et une partie mobile (*induit*). Les inducteurs sont constitués par des électro-aimants, qui créent un *champ magnétique* dans lequel se déplace l'induit ; cet induit n'est autre qu'un cylindre ou un anneau portant certains enroulements en fils ou en barres de cuivre isolés et c'est par le passage de ces enroulements dans le champ magnétique, que le courant se trouve engendré.

L'anneau ou le cylindre n'ont pas seulement pour objet de supporter les enroulements. Ils renforcent le champ magnétique, car, étant en métal, ils sont pour lui de bien meilleurs conducteurs que l'air ambiant.

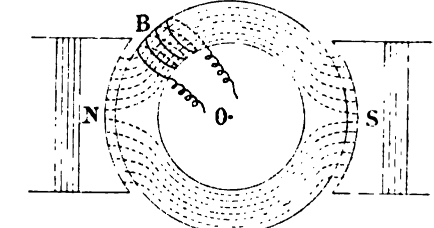
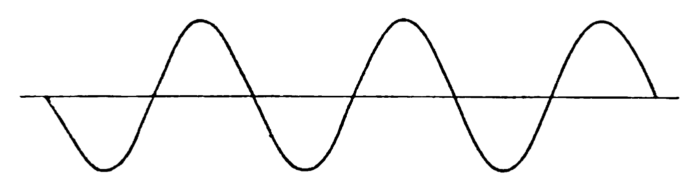


Fig. 18. — Production du courant dans une machine à anneau.

Considérons, pour la commodité de l'exposition, une machine à anneau et une bobine élémentaire enroulée sur cet anneau


Fig. 19. — Représentation de la force électromotrice en fonction du temps.

(fig. 18). Si l'on suppose seulement deux inducteurs (machine bipolaire) la force électromotrice qui se développera dans la bobine sera alternative et de la forme $e = E \sin 2\pi \frac{t}{T}$. La période T est la durée complète d'une rotation et E le maximum de la force électromotrice. Graphiquement, cette force électromotrice peut être représentée, en fonction du temps, par la figure 19. En reliant les extrémités de la bobine à un commutateur à coquille, monté sur l'axe de l'anneau et tournant avec lui (fig. 20),

on obtiendra, dans un circuit utilisateur quelconque, prenant contact avec le commutateur par des balais, des *courants redressés*, c'est-à-dire que la force électromotrice ainsi produite pourra être représentée graphiquement par la figure 19 dont la partie négative aurait été relevée verticalement en tournant autour de l'axe de figure (fig. 21). Un tel courant sera, toutefois, *ondulatoire* et non *continu*. On arrive au courant continu en multipliant les bobines et en donnant au commutateur autant de lames isolées qu'il y a de bobines. Ce

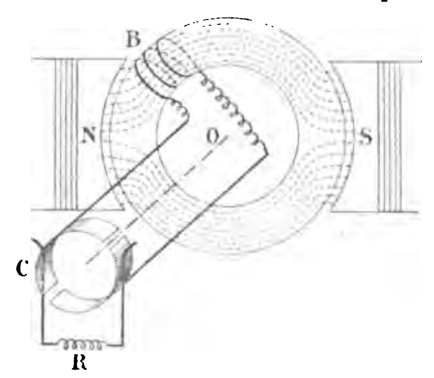
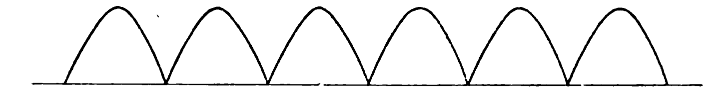
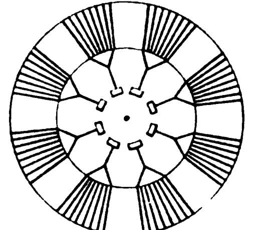


Fig. 20. — Redressement du courant par le commutateur à coquille.


Fig. 21. — Représentation graphique d'un courant redressé.

commutateur deviendra un *collecteur* (fig. 22) et la superposition de toutes les sinusoïdes correspondant à chaque bobine donnera une ligne résultante, à peu près horizontale, qui sera la tension E du courant continu.


Fig. 22. — Principe du collecteur.

Cette tension sera d'autant plus forte que le champ magnétique φ sera plus intense, que la longueur l des fils ou des barres de l'enroulement sera plus considérable et que la vitesse de rotation (ou le nombre n de tours par seconde) seront plus élevés, ce qui se traduit par l'expression $E = Kln\varphi$.

Nous avons tenu à rappeler ces principes, non pas pour donner

une théorie complète de la dynamo, mais pour bien mettre en relief le mode de formation du courant. On voit ainsi qu'une dynamo ne donne du courant continu que par l'intervention du collecteur. Elle est, avant tout, une machine à courant alternatif. En reliant, en effet, les extrémités de la bobine élémentaire considérée, non à un *commutateur*, mais à deux bagues, on obtiendrait dans le circuit utilisateur uniquement du courant alternatif. Nous verrons, dans la suite, des applications très importantes de cette particularité.

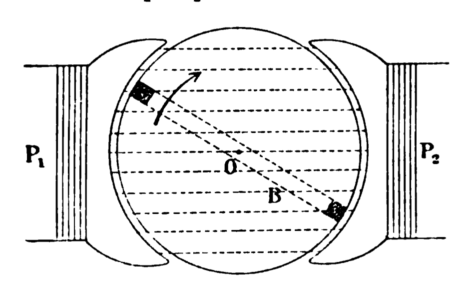


Fig. 23 — Machine à tambour.

Le raisonnement qui a été fait pour une machine à anneau est le même pour une machine à cylindre (que l'on appelle plus communément machine à tambour). Ces cylindres sont munis à leur périphérie d'encoches dans lesquelles sont logés des conducteurs isolés. Or ces conducteurs sont, comme la bobine élémentaire considérée précédemment, le siège de forces électromotrices alternatives. Leur jonction avec un collecteur donne, au contraire, une force électromotrice pratiquement constante.

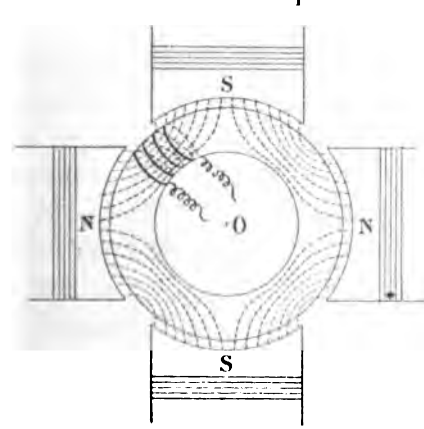


Fig. 24. — Principe d'une dynamo multipolaire.

Les génératrices à courant continu employées dans les usines pour traction sont généralement des machines à tambour qui

utilisent mieux la place laissée libre par les inducteurs et qui sont plus robustes que les machines à anneau.

Les anneaux, comme les tambours, ne sont pas constitués par une seule masse de métal à grande perméabilité magnétique, et destinée, d'après les principes exposés plus haut, à former, pour le champ magnétique, comme un trait d'union entre les pôles des inducteurs. Afin de diminuer l'importance des courants de Foucault (courants parasites qui se développent dans les masses de métal soumises à un champ magnétique variable), cette partie de l'induit est constituée par des disques en tôle de faible épaisseur, empilés perpendiculairement à l'arbre de rotation. Ces disques sont séparés les uns des autres par une petite couche isolante. Les courants de Foucault, s'établissant perpendiculairement aux disques, sont arrêtés par l'isolant ; d'autre part les disques se trouvent dans la direction même des lignes de force du champ magnétique qui ne subit, par suite, aucun affaiblissement du fait de ce mode de construction.

Une autre disposition caractéristique des génératrices pour traction, c'est qu'elles sont presque toujours *multipolaires*. Supposons que, dans la figure 18, au lieu de deux pôles, on ait quatre pôles alternativement nord et sud (fig. 24.) Le courant produit dans la bobine élémentaire sera encore alternatif, mais toutes les phases de l'alternance se seront réalisées pour une demi-rotation seulement. On aura donc, dans la moitié du collecteur, l'ensemble des phénomènes qui, avec deux pôles, se passaient dans la totalité. On sera, par suite, amené à avoir quatre balais, au lieu de deux. Mais on conçoit qu'en réunissant deux à deux les conducteurs qui sont dans une même situation relative par rapport aux pôles, et dont, par suite, les forces électromotrices sont toujours identiques, on puisse se contenter encore de deux balais. Autrement dit, une machine à quatre pôles n'est pas forcément à quatre balais ; plus généralement une machine à n pôles peut très bien n'avoir que deux balais. C'est une question de fabrica-

tion. Mais, naturellement, les connexions sont, dans ce dernier cas, assez compliquées.

L'induit des dynamos multipolaires présente toujours les dispositions fondamentales précédemment indiquées (disques en



Fig. 25. — Carcasse d'un induit Westinghouse.

tôle avec rainures pour le logement des conducteurs). Mais, en raison de la disposition et de la répartition des champs magnétiques, les disques sont seulement placés à la périphérie de l'induit, formant une sorte de jante reliée à l'axe de rotation par des bras en fonte ou en acier. La figure 25 montre comment est constitué un induit Westinghouse, pour dynamo multipolaire. La

figure 26 se rapporte, d'autre part, à la grande dynamo de 1 500 kilowatts, que les établissements du Creusot ont construite pour l'usine du chemin de fer métropolitain, à Paris.



Fig. 25. — Induit d'une dynamo de 1500 kilowatts. (Chemin de fer métropolitain de Paris). (Ateliers du Creusot.)

L'avantage des machines multipolaires, c'est d'abord une meilleure utilisation des espaces ; ensuite on obtient des machines plus ramassées, plus équilibrées et partant plus robustes (fig. 27). Elles nécessitent, en outre, une vitesse de rotation moindre que les machines bi-polaires puisque, toutes choses égales d'ailleurs,

elles produisent les forces électromotrices à utiliser pendant un temps $\frac{n}{2}$ fois moindre.

La diminution de la vitesse de rotation a été et est encore l'un des objectifs principaux des constructeurs de dynamos. Le but

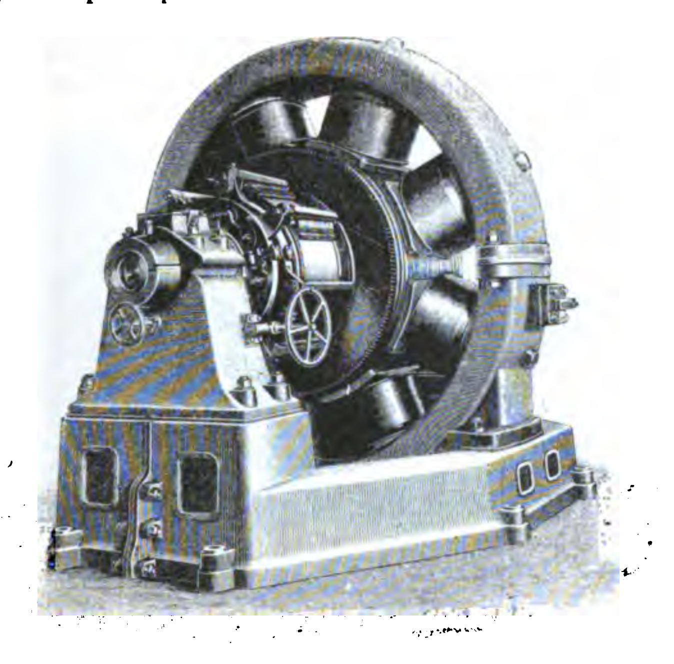


Fig. 27. — Dynamo multipolaire pour traction.

poursuivi était surtout de permettre l'accouplement direct avec les machines à vapeur, machines dont la vitesse de rotation ne descend guère au-dessous de 60 à 70 tours par minute. De cette façon on évite les pertes de travail que produisent les transmissions par engrenages et par courroie (fig. 28 et et 29). Mais, en agissant ainsi, on s'est condamné à n'utiliser qu'une partie des merveilleuses qualités des dynamos. Étant donné que le courant est produit dans une dynamo par un simple mouvement rotatif et que, d'autre part, un tel mouvement se prête bien à des vitesses très

élevées, il est clair qu'il y a intérêt à tourner vite, puisque la tension du courant est proportionnelle à la vitesse de rotation. Sous une autre forme on peut dire qu'en augmentant la vitesse de rotation on pourra, à puissance égale, diminuer l'encombrement, le poids et par suite, le prix d'une dynamo. Il n'y a donc pas intérêt, en se plaçant au seul point de vue de la production électrique, à avoir des dynamos tournant trop lentement.



Fig. 28. — Dynamo multipolaire de 500 kilowatts (Westinghouse).

Ces principes attirent de nouveau l'attention des industriels et la construction d'une nouvelle classe de machines à vapeur permet d'en faire une application rationnelle et économique. Nous voulons parler des *turbines à vapeur*, qui se répandent de plus en plus et qui se prêtent admirablement à des accouplements directs avec des dynamos à grande vitesse.

On retrouve les mêmes avantages avec les *turbines à eau*, moteurs excellents, à tous les points de vue, et dont les qualités remarquables ont bien été mises en évidence par les nombreuses applications qui viennent d'être faites de l'utilisation, pour la traction, des forces hydrauliques naturelles.

Les dynamos à courant continu offrent cet avantage qu'elles

peuvent elles-mêmes *exciter* leurs inducteurs, c'est-à-dire produire le champ magnétique nécessaire à la création du courant. Cette particularité, extrêmement remarquable, est due au *magnétisme rémanent* des inducteurs. On constate, en effet, quand une dynamo s'arrête, que les inducteurs conservent néanmoins une certaine quantité de magnétisme ; or ces inducteurs sont entourés de fils reliés aux balais de la dynamo. Dès que



Fig. 29. — Dynamo multipolaire de 1500 kilowatts (South Side Elevated Railroad. Chicago).

la machine tourne, le champ magnétique rémanent suffit pour développer dans l'induit une certaine force électromotrice, créant, entre balais, une petite différence de potentiel. Le circuit inducteur se trouve donc légèrement excité et accroît l'intensité du champ magnétique. Aussitôt, la différence de potentiel aux balais s'élève, le courant d'excitation augmente et le champ magnétique devient plus puissant. On arrive ainsi, finalement, au régime qui correspond à l'allure normale de la dynamo.

Les dynamos employées dans les usines pour traction sont le plus souvent *compound*. C'est-à-dire que le circuit inducteur est double, comprenant un circuit en *série* avec l'induit et le circuit extérieur et un circuit en fil plus fin, *en dérivation*.

Quel est le but de l'excitation compound? C'est de rendre la tension sensiblement constante, quel que soit le débit de la machine. On s'explique ce résultat en remarquant qu'une dynamo simplement excitée en série a tendance à subir une diminution de force électro-motrice, quand le courant diminue, puisque le circuit des inducteurs se trouve plus faiblement excité. Au contraire une dynamo en dérivation, c'est-à-dire excitée par un circuit à fil fin branché sur les balais, envoie dans son circuit d'excitation d'autant plus de courant qu'il en passe moins dans le circuit extérieur. Le champ magnétique a alors tendance à augmenter et à accroître la force électromotrice de l'induit. Les deux modes d'excitation, considérés isolément, ont donc des effets diamétralement différents. On conçoit qu'en les combinant, on puisse obtenir le maintien du champ magnétique à une valeur sensiblement constante, ce qui assure la permanence de la tension du courant.

Le mode de création du champ magnétique des dynamos n'est qu'une application de la célèbre découverte d'Ampère relative aux électro-aimants. C'est-à-dire que la circulation d'un courant électrique continu dans des fils entourant une masse de fer transforme cette masse en aimant. Mais, comme cette propriété est générale, elle s'applique aussi bien aux conducteurs de l'induit qu'aux conducteurs des inducteurs.

Si donc on considère, par exemple, une machine à anneau, les courants qui circulent dans chaque moitié de l'anneau, entre les balais, formeront deux aimants dont les champs magnétiques viendront s'opposer au champ magnétique produit par les inducteurs. C'est là ce que l'on appelle la *réaction d'induit.* Elle se manifeste par une distorsion du champ magnétique inducteur, qui déplace la ligne neutre de l'anneau et oblige à déplacer les balais de telle façon qu'ils prennent contact avec l'induit suivant cette ligne neutre déviée. Cette opération s'appelle le *calage des balais.* On s'aperçoit que les balais sont mal calés, aux

étincelles qui se produisent entre leurs extrémités et l'induit. Il faut alors les déplacer, jusqu'à réduire les étincelles au minimum.

Lorsque, dans une usine, le courant est fourni par plusieurs dynamos, on doit, pour obtenir le courant total, les réunir *en quantité*, ce que l'on appelle également les *mettre en parallèle*. On relie, dans ce cas, les balais à deux barres collectrices qui se trouvent être, par conséquent, au même potentiel que ces balais et sur lesquelles on branche les circuits utilisateurs.

On conçoit qu'avec des dynamos identiques la production doive se répartir d'une façon égale entre les diverses unités. Mais si les dynamos sont de puissance et de fabrication différentes, leurs *caractéristiques* peuvent très bien ne pas concorder. On fait alors usage du *fil d'équilibre*, conducteur à faible résistance qui réunit les balais positifs et que commande un interrupteur dit d'égalisation.

Ainsi qu'il a été dit plus haut les dynamos compound sont celles qui sont employées le plus fréquemment dans les usines de traction. Elles permettent, comme on l'a vu, d'assurer une distribution à *potentiel constant*. Mais les barres du tableau sont seules à potentiel constant. Si l'on a à transporter le courant par un câble de résistance R, il se produit une perte de charge RI. variable avec le débit I et la tension n'est plus constante au point d'utilisation. On évite cet inconvénient par l'emploi de *dynamos hypercompound*, qui donnent une tension constante non plus aux balais, mais à l'extrémité du conducteur qui les réunit au point d'alimentation.

Les dynamos avec excitation en série, dont les qualités sont si remarquables quand on les emploie comme réceptrices, c'est-à-dire comme moteurs, ne servent guère pour la traction, sauf dans le cas où l'on veut produire du courant continu à haute tension. M. Thury, qui s'est fait le vulgarisateur de ce système, emploie, alors, plusieurs dynamos identiques, excitées en série, et qu'il monte également en série, c'est-à-dire que le cou-

rant produit par la première dynamo passe dans la seconde, puis dans la troisième, etc., augmentant chaque fois sa tension de celle de la dynamo traversée. On peut, de cette façon, par la mise en série de dynamos identiques et à potentiel relativement bas, obtenir des tensions très élevées. On tourne ainsi les difficultés de construction que présentent les dynamos à courant continu et à haute tension[1].

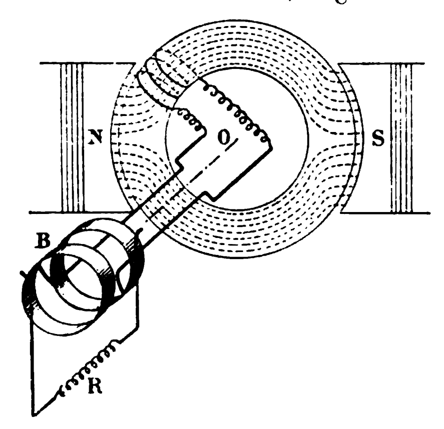


Fig. 30. — Principe de la production du courant alternatif.

b) *Génératrices à courant alternatif*. — Nous avons vu qu'une bobine, en tournant dans un champ magnétique, était le siège d'une force électromotrice alternative $e = E \sin 2 \pi \frac{t}{T}$. En réunissant les extrémités de la bobine respectivement à deux bagues montées sur l'arbre de rotation et en branchant sur ces deux bagues, par des balais, un circuit utilisateur quelconque (fig. 30) on distribuera dans le circuit un courant alternatif simple ou monophasé.

Supposons que la bobine tourne non pas dans un seul champ magnétique, mais dans une série de champs magnétiques disposés circulairement comme dans une dynamo multipolaire. Le courant produit sera encore alternatif, mais la période T sera diminuée et deviendra $\frac{T}{n}$ en supposant qu'il y ait $2n$ pôles.

Enfin, au lieu d'une seule bobine, considérons n bobines semblables placées sur l'anneau, suivant une disposition symétrique correspondant aux $2n$ pôles considérés.

[1] Les dynamos à courant continu ne se font que rarement pour plus de 3 000 volts. Principalement en raison des difficultés d'exécution du collecteur, qui doit présenter un nombre de lames d'autant plus grand que la tension est plus élevée.

Ou ces bobines seront montées en « série » et la tension résultante sera égale à n fois la tension produite dans une bobine.

Ou elles seront reliées en « quantité » et, dans ce cas, la tension sera toujours égale à $e = E \sin 2 \pi \frac{t}{T}$, mais le courant produit aura une intensité n fois plus grande.

Les machines à courant alternatif simple, en matière de traction, servent surtout pour le transport de la force à distance. Elles

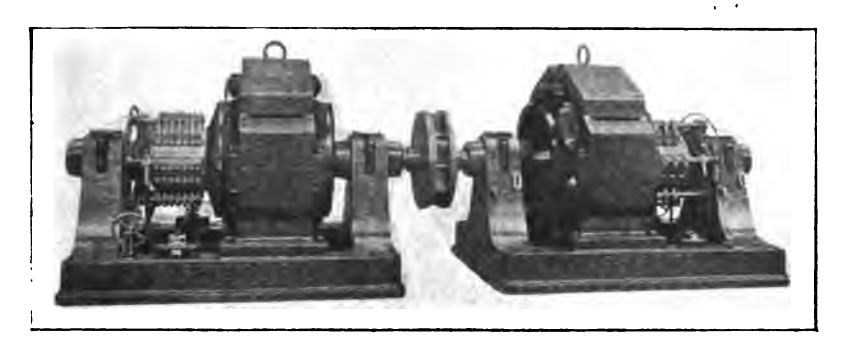


Fig. 31. — Groupe d'excitation pour alternateur (Chemin de fer métropolitain de Paris).

offrent cet avantage de pouvoir produire facilement des tensions élevées puisque, d'une part, le collecteur n'existe plus et que, d'autre part, il suffit de multiplier le nombre de pôles et le nombre des bobines pour augmenter rapidement la tension.

La suppression des collecteurs est une grande simplification, ces organes étant sujets à se détériorer par suite des étincelles ou de l'usure de la matière. Ils seraient d'ailleurs à peu près impraticables pour des tensions très élevées.

Une dynamo à courant alternatif ne peut pas exciter convenablement ses inducteurs, puisqu'elle produirait non un champ magnétique constant, mais un champ magnétique sinusoïdal. On a recours, pour assurer cette excitation, à une *excitatrice*, c'est-à-dire à une petite dynamo à courant continu, que met en mouvement un moteur spécial (fig. 31).

Le groupement d'alternateurs en *quantité* (ou en *parallèle*) présentait autrefois de grandes difficultés et certaines machines ne pouvaient même jamais s'accoupler. Mais, aujourd'hui, les constructeurs donnent aisément, à ce sujet, toutes garanties. Une condition est que le moteur tourne bien régulièrement. quand on considère non seulement le nombre de tours par minute, mais encore la vitesse de rotation pendant un tour complet. Dans le cas des machines à vapeur, l'emploi de forts volants augmente

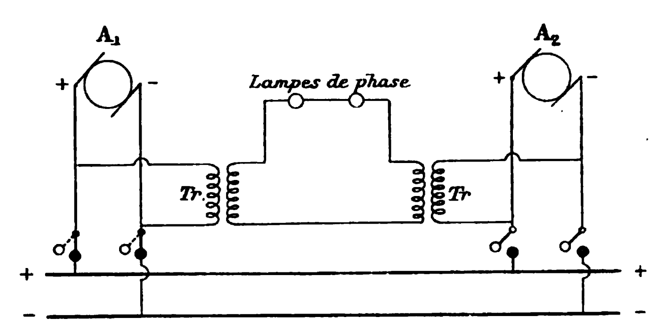


Fig. 32. — Lampes de phase, pour le couplage des alternateurs.

sensiblement le coefficient de régulation et il n'est pas rare, dans les installations modernes, de voir des moteurs pour alternateurs munis de volants de 30 à 40 tonnes.

Certains constructeurs, pour faciliter le couplage, ont complété leurs alternateurs par des amortisseurs. Ce sont des barres de cuivre dans lesquelles les courants arrivant de la machine qui n'est pas en concordance de phase créent des courants qui s'opposent à une modification de la vitesse et tendent à l'établissement du synchronisme.

Quand on a des machines se couplant facilement on saisit très commodément le moment où l'on doit accoupler les alternateurs, en faisant usage de l'*indicateur de phase* (fig. 32). Cet appareil consiste en deux lampes à incandescence (par exemple de 110 volts. chaque) montées en série, et sur le circuit desquelles sont insérés

les secondaires de deux petits transformateurs, dont les primaires sont respectivement alimentés par les alternateurs à coupler. Les secondaires de ces petits transformateurs donnent du courant alternatif à 110 volts. S'il y a concordance de phase, les lampes reçoivent 220 volts, soit 110 volts chaque et brillent d'un vif

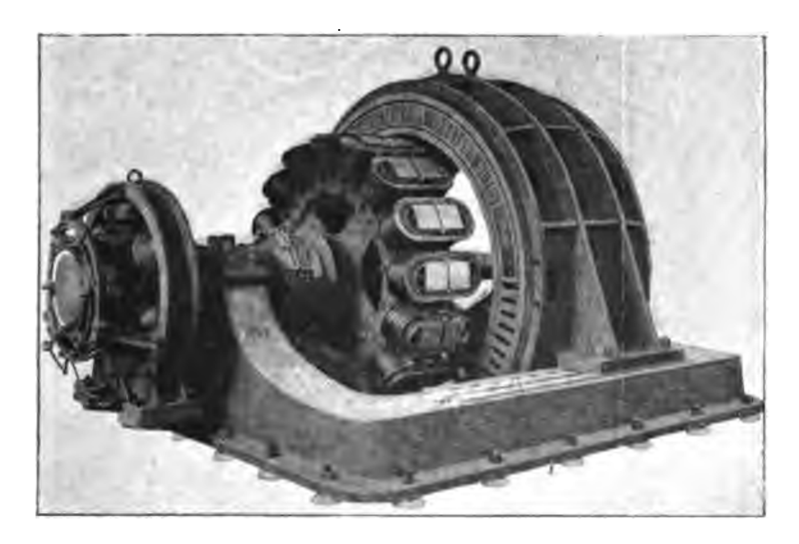


Fig. 33. — Alternateur avec champ magnétique inducteur mobile. (L'induit peut se déplacer latéralement pour dégager les inducteurs) (Œrlikon).

éclat ; au contraire, dès qu'il n'y a plus concordance de phase, la lumière varie, s'éteignant à certains moments pour revenir à son maximum. C'est ce dernier instant que l'on choisit pour abaisser l'interrupteur de couplage. Cette manœuvre, bien que facile, doit être faite par un opérateur de sang-froid et ne se laissant pas intimider par les différents phénomènes lumineux ou sonores qui peuvent se produire, quand le couplage ne réussit pas, ce qui arriverait, par exemple, si l'on n'avait pas bien saisi le moment de la grande luminosité de l'indicateur de phase.

Revenons à l'exemple que nous avons pris en commençant, c'est-à-dire au cas d'une bobine enroulée sur un anneau et se

déplaçant dans un champ magnétique. Il s'y produit, comme on l'a dit, une force électromotrice alternative égale à $E \sin 2\pi \frac{t}{T}$. Si, au lieu d'une seule bobine on en considère trois, placées à

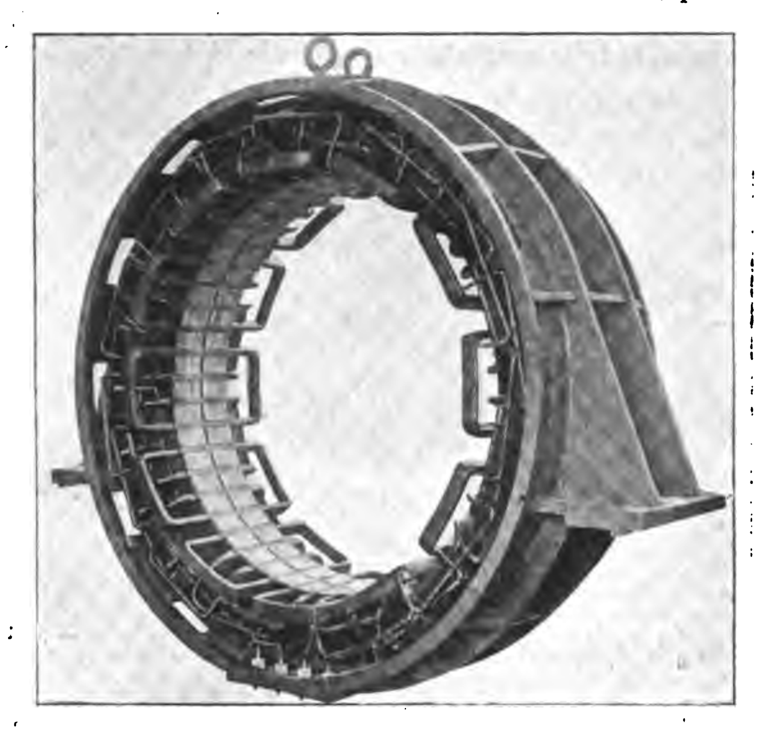


Fig. 34. — Induit d'un alternateur triphasé.

égale distance sur l'anneau, on aura encore dans chacune d'elles trois courants alternatifs ; mais ces courants seront « décalés » l'un par rapport à l'autre d'un tiers de période. Ce seront donc des *courants triphasés*. En sorte que l'on voit qu'il est bien facile d'obtenir des courants triphasés avec des machines tout à fait analogues à des machines à courants alternatifs simples. Soit, par exemple, le cas d'une machine multipolaire. Entre deux pôles de même nom, on intercalera 3 bobines également espacées et celles-ci seront, d'après ce que l'on vient de dire, le siège de

forces électromotrices triphasées. Si l'on a $2n$ pôles, on prendra n séries de 3 bobines et celles-ci, réunies entre elles, donneront soit un courant triphasé d'intensité n fois plus forte (montage en

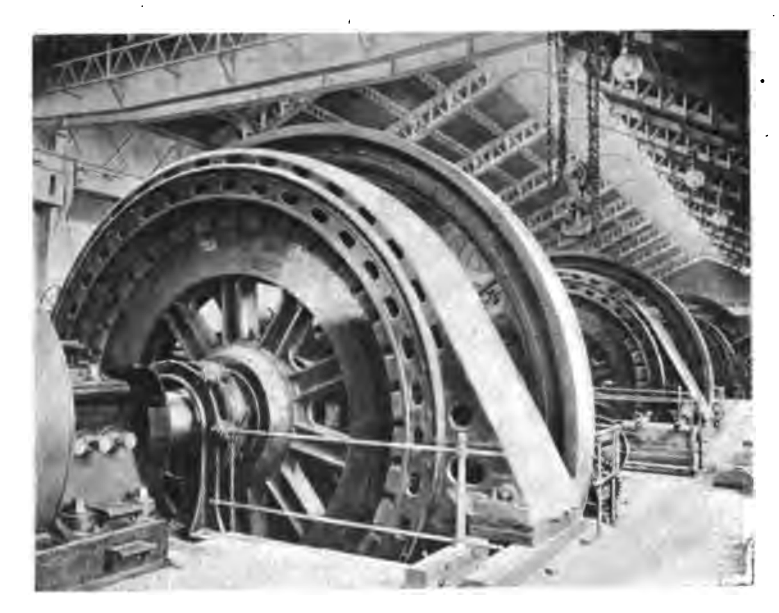


Fig. 35. — Alternateur triphasé Westinghouse de 800 kilowatts, 5 000 volts 25 périodes (Usine des Moulineaux. Ligne des Invalides à Versailles).

parallèle ou en quantité), soit une tension triphasée trois fois plus forte (montage en tension).

Pour obtenir des courants biphasés il suffirait d'espacer les bobines de telle façon que les tensions diffèrent d'un quart de période.

Dans tout ce qui précède, nous avons supposé que le ou les champs magnétiques étaient fixes et que les bobines étaient mobiles. Mais il est clair que l'on obtiendrait les mêmes résultats en prenant des bobines fixes et des champs magnétiques mobiles, les bobines se trouvant toujours dans un champ magnétique variable, cette variation étant d'autre part nécessaire et suffisante

pour créer le courant alternatif. Or, les grands alternateurs modernes sont presque tous ainsi établis. L'avantage est que, seules, les parties fixes de la machine sont parcourues par des courants alternatifs, ce qui est particulièrement désirable, quand on a affaire à des courants à haute tension.

La figure 33 montre un alternateur de ce type que construisent les ateliers d'Œrlikon. L'induit peut se déplacer parallèlement à lui-

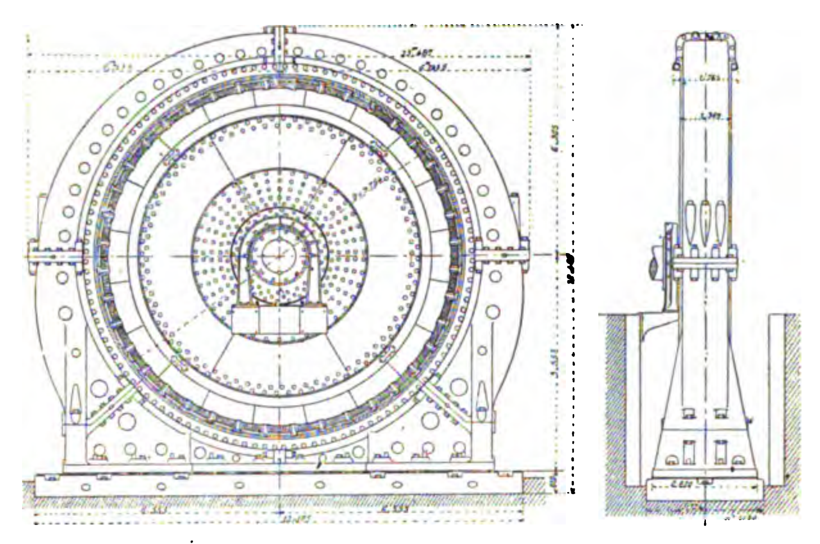


Fig. 36. — Alternateur triphasé de 5 000 kilowatts, 11 000 volts, 25 périodes (Chemin de fer élevé de New-York).

même, de manière à permettre une visite complète des inducteurs.

Le principe de la production du courant alternatif par inducteurs mobiles est également applicable au cas des courants triphasés. Il suffit alors de bobiner la partie fixe en conséquence. La figure 34 représente un induit de cette nature. Le courant triphasé recueilli est dirigé vers trois bornes, où se font les prises de courant. Des bagues ne sont plus en effet nécessaires, puisque le courant est produit dans une partie fixe. Cependant il faut encore deux bagues sur l'arbre de rotation des inducteurs pour amener à ceux-

ci, d'une façon continue, le courant qui assure leur excitation.

On a, dans ces dernières années, été amené à augmenter de plus en plus la puissance des alternateurs. Un alternateur d'un millier de kilowatts est aujourd'hui chose courante. Celui que représente la figure 35 a une puissance de 800 kilowatts, avec surcharge possible de 50 p. 100. Il a été établi par la Cie Westinghouse pour l'usine des Moulineaux, qui alimente la ligne des Invalides à Versailles et qui doit fournir de l'électricité à une grande partie des lignes de banlieue de la Cie des Chemins de fer de l'Ouest. La tension a été fixée à 5 000 volts. Le nombre de périodes est de 25. L'usine des Moulineaux renferme 9 alternateurs de ce système. L'expérience a prouvé que ceux-ci se comportaient d'une façon parfaite, se groupant très aisément en parallèle.

La figure 36 représente l'un des grands alternateurs triphasés du chemin de fer élevé de New-York (Manhattan Railway). Chaque alternateur a une puissance de 5 000 kilowatts. Le courant produit a une tension de 11 000 volts et une fréquence de 25 périodes par seconde. Les dimensions de ces colossales machines sont de 12,468 m. pour la hauteur de la partie fixe et de 9,60 m. pour le diamètre de la partie tournante. Le poids de cette dernière est d'ailleurs de 160 000 kilogrammes.

La vitesse de rotation est de 75 tours par minute. Bien que ce chiffre soit faible, la vitesse, à la périphérie de la partie tournante, atteint, en raison des grandes dimensions de cette partie, environ 40 mètres à la seconde. Il a donc fallu prendre des précautions spéciales pour éviter les effets mécaniques de la force centrifuge. Le moyeu est en acier coulé et la jante lui est rattachée non par des bras, mais par deux plateaux en tôle. La jante est elle-même constituée par une série de segments en acier coulé boulonnés entre eux et sur la jante. Enfin les inducteurs proprement dits, comprennent une carcasse en tôles feuilletées, s'assemblant à queue d'aronde avec la jante et des bobines que réunissent deux à deux des cales en métal non magnétique.

Le rendement des alternateurs est de :

90 p. 100 à quart de charge;

94,5 — à demi-charge;

95,5 p. 100 à tiers de charge;

96,5 — à pleine charge.

L'échauffement, après vingt-quatre heures de marche à pleine charge, ne dépasse pas, de plus de 35 degrés, la température ambiante et la machine peut impunément supporter une surcharge de 50 p. 100 pendant plusieurs heures.

L'excitation de tels alternateurs absorbe 225 ampères sous 220 volts, soit environ 60 kilowatts. On a intérêt, dans ces conditions, à produire le courant d'excitation par un groupe électrogène avec moteur à vapeur, d'autant plus que le groupe peut exciter également plusieurs alternateurs. Les groupes d'excitation ont chacun une puissance de 250 kilowatts et comportent une dynamo à courant continu de même puissance et des machines compound-tandem horizontales, actionnant directement ces dynamos (vitesse, 220 tours par minute).

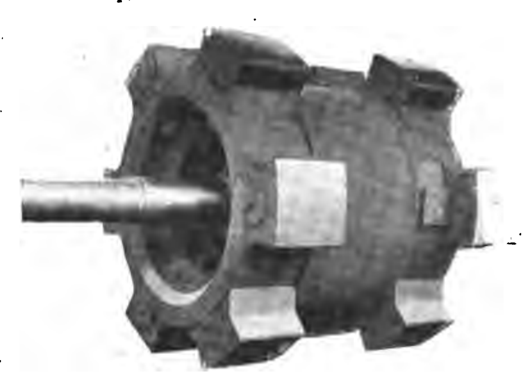


Fig. 37. — Fer tournant pour alternateur.

Enfin, il nous reste à citer une catégorie de machines dans lesquelles les seules parties tournantes sont constituées par des masses de fer (machines à fer tournant). Si l'on considère des bobines inductrices placées en regard de bobines induites et, entre les deux, un espace dans lequel tournent des pôles en fer disposés suivant les rayons d'une circonférence, on voit que le champ magnétique, maximum au moment où les pôles seront en

regard des bobines, ira ensuite en décroissant quand les pôles s'éloigneront. Ces variations du champ produiront dans les bobines induites des courants électriques, tout se passant comme si le champ était fixe et les bobines mobiles. Les ateliers d'Œrlikon,

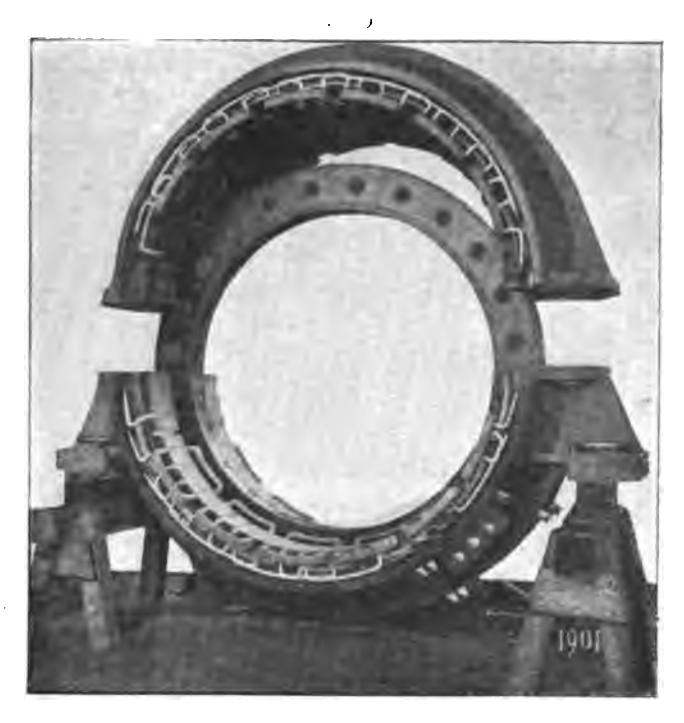


Fig. 38. — Partie fixe d'un alternateur à fer tournant.

qui construisent ce genre de machines, constituent le fer tournant par une double rangée de pôles entre lesquels est montée la bobine inductrice. Elle est unique et forme comme un grand disque débordant légèrement sur la ligne des bobines qui sont placées de part et d'autre (fig. 38). Le champ magnétique se ferme d'une part, par la carcasse qui réunit les bobines induites et d'autre part par le fer tournant. Des ouvertures ménagées dans la carcasse permettent une ventilation très satisfaisante de la machine,

l'air étant violemment chassé par le fer tournant. Aussi l'augmentation de température ne dépasse-t-elle pas 30 à 35° à pleine charge. La figure 39 montre un alternateur triphasé de 570 kilowatts, de ce système, construit par les ateliers d'Œrlikon pour le chemin de fer de la Jungfrau. La tension est de 7 000 volts.

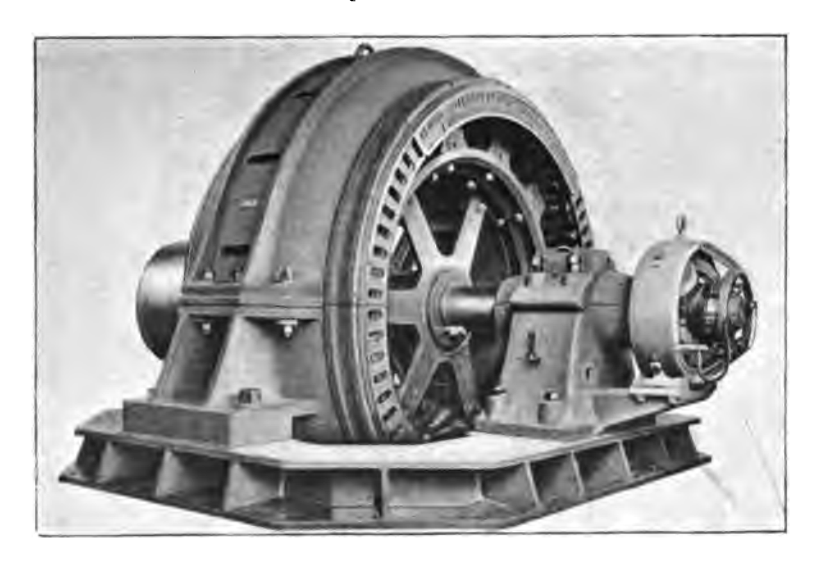


Fig. 39. — Alternateur à fer tournant de 570 kilowatts, 7 000 volts, 38 périodes, du chemin de fer de la Jungfrau.

avec une fréquence de 38. L'excitation, est assurée par une petite dynamo à courant continu, montée sur l'une des extrémités de l'arbre de l'alternateur [1].

Tableaux de distribution et de manœuvre. — On appelle ainsi des tableaux, généralement en marbre, ou tout autre matière isolante et incombustible, sur lesquels sont concentrés les appareils servant à la manœuvre des dynamos et à l'envoi du courant dans les feeders.

[1] Les alternateurs à fer tournant ne se fabriquent guère maintenant que sur demande spéciale, coûtant plus cher que des alternateurs ordinaires et ayant un moins bon rendement.

La figure 40 montre un type de tableau pour usine à courant continu. On voit que ce tableau est divisé en panneaux. Les deux panneaux de droite servent pour la manœuvre des dynamos, au nombre de deux, dans le cas actuel. Chaque dynamo a son

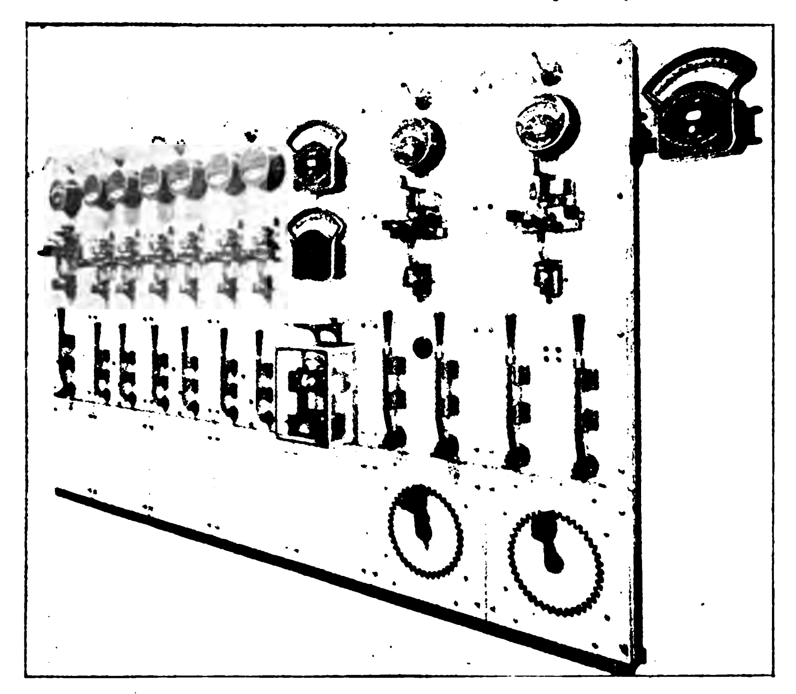


Fig. 40. — Tableau de distribution pour usine à courant continu.

panneau. En arrière, se trouvent deux barres en cuivre dans lesquelles se déverse le courant (une barre positive et une barre négative). Le courant ne s'y rend qu'après avoir traversé un interrupteur à main, un interrupteur automatique et un ampèremètre. Un voltmètre, placé à droite, en saillie, peut être connecté, à l'aide d'une fiche, avec chaque panneau.

A la partie inférieure de chaque panneau et pour chaque génératrice se trouve le rhéostat d'excitation correspondant. Quant à l'interrupteur d'égalisation, il est placé près des machines, sur un

socle spécial. Les panneaux pour le départ des feeders se trouvent vers la gauche. Chaque feeder est commandé par un interrupteur à main et un interrupteur automatique[1]. De plus un ampèremètre et un voltmètre donnent, pour chaque feeder, le débit et le voltage.

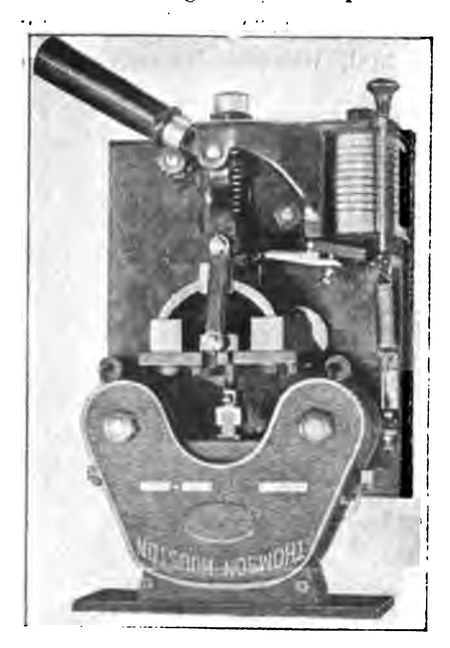


Fig. 41. — Disjoncteur automatique Thomson-Houston.

Les interrupteurs automatiques sont des instruments particulièrement précieux dans une usine pour traction, ayant le grand avantage d'isoler celle-ci, dès que la demande de courant devient excessive — soit qu'il se produise un court circuit sur la ligne, soit plus simplement que plusieurs démarrages aient lieu en même temps. — Le principe est de faire déclancher un ressort sous l'action d'un électro-aimant, qui intervient dès que le courant dépasse une valeur donnée. Les contacts se font par des blocs de charbon que l'on peut facilement remplacer quand ils ont été détériorés par les arcs qui accompagnent généralement la rupture. Les figures 41 et 42 donnent deux types de ces interrupteurs; le premier est construit par la Cie Thomson Houston; le second est fabriqué par la Cie Westinghouse.

Quand les feeders sont aériens, il est indispensable de protéger

[1] Les interrupteurs automatiques pour machines ou feeders sont réglables en ce sens que l'on peut les faire declancher pour une valeur donnee de l'intensité, que l'on ne veut pas dépasser. On peut aussi ne les faire déclancher que quand cette intensité limite s'est maintenue pendant un nombre déterminé de secondes.

chacun d'eux par un parafoudre. Mais il est recommandable de monter ces appareils en dehors du tableau et même en dehors de l'usine. Nous en reparlerons dans un prochain chapitre.

Enfin on aperçoit au milieu du tableau les appareils de mesure comprenant un wattmètre, un ampèremètre et un voltmètre.

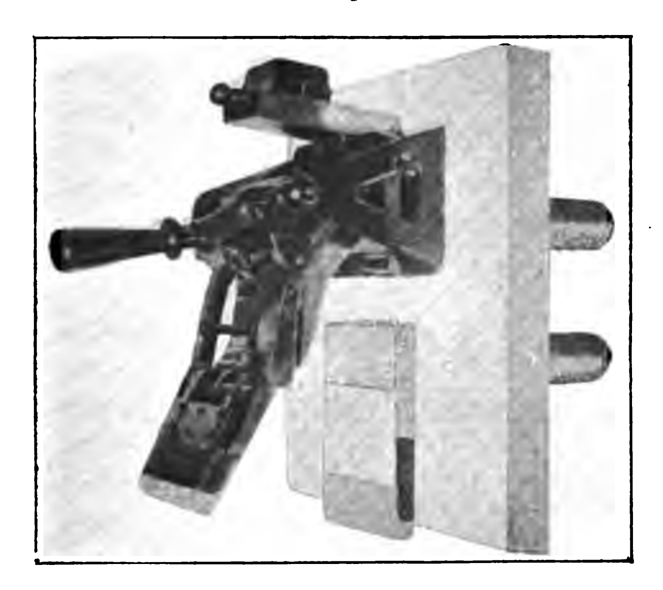


Fig. 42. — Disjoncteur automatique Westinghouse.

S'il s'agit d'une *usine à courants triphasés*, on retrouvera une disposition analogue, sauf cependant qu'un tableau supplémentaire sera nécessaire pour la manœuvre des excitatrices.

La figure 43 montre l'avant et l'arrière d'un tableau pour usine triphasée, à 5 000 volts. Les barres collectrices sont au nombre de trois et le courant de chaque machine y est déversé en passant d'abord par un interrupteur tripolaire (fig. 44)[1], puis par un interrupteur automatique (fig. 45 et 46). Cet interrupteur est triple, à

[1] Généralement ces interrupteurs fonctionnent dans un bain d'huile, cette substance « étouffant » l'arc qui tend à se former, à la rupture.

raison d'un interrupteur par phase et les trois branches déclanchent

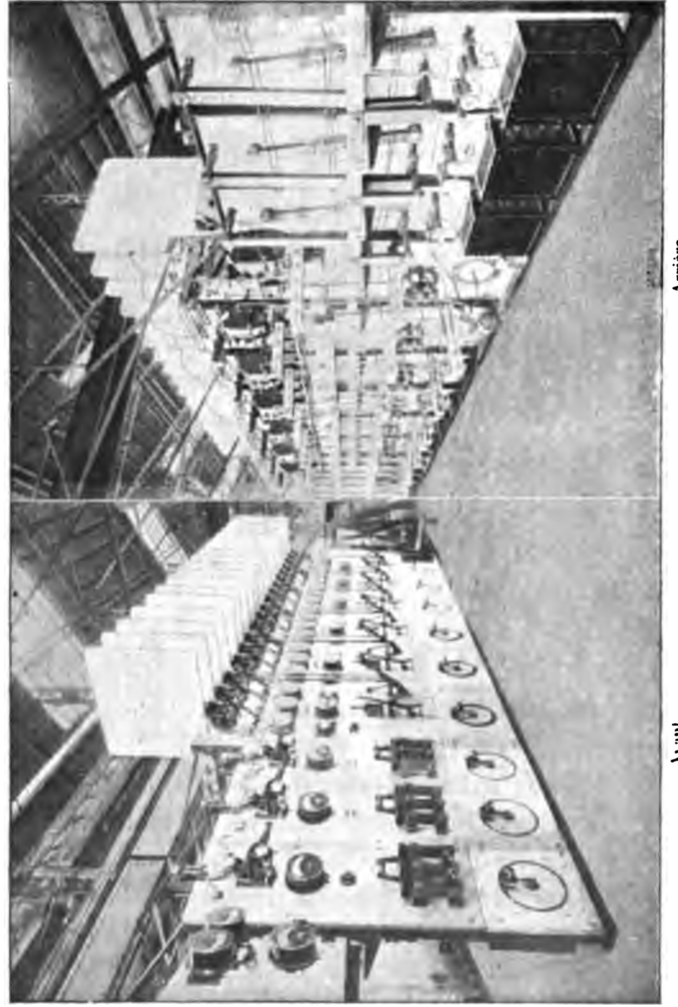


Fig 13. — Tableau de distribution pour usine à courants triphasés.

à la fois. On le remet en place à l'aide d'un levier dont la manette est située près de la poignée commandant l'interrupteur tripolaire.

Lorsque l'interrupteur déclanche, il se produit un arc, très

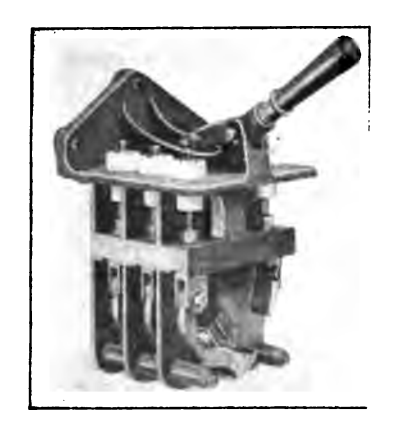




Fig. 44. — Interrupteur tripolaire (sans enveloppe et avec enveloppe).



Fig. 45. — Disjoncteur automatique.

intense qui a tendance à diverger vers les objets métalliques voisins.

Aussi la Cie Westinghouse protège-t-elle latéralement ses interrupteurs automatiques à haute tension par des joues en marbre, qui arrêtent l'arc électrique. Ces joues en marbre sont parfaitement visibles à la partie supérieure du tableau.

Chaque panneau de machine comporte en outre son indicateur de phase, pour le couplage en parallèle, et son rhéostat d'excitation. Les départs de feeders se font comme l'arrivée du courant, à

l'aide d'interrupteurs tripolaires et de disjoncteurs automatiques triples.

Nous aurons l'occasion de reparler des tableaux de distribution quand nous examinerons les sous-stations de transformation. Bornons-nous seulement à rappeler que les tableaux doivent toujours être installés dans un endroit bien sec et qu'il faut s'arranger pour qu'ils ne puissent être atteints par les eaux de condensation ou autres. Le montage et les jonctions des câbles devront être faits avec le plus grand soin et l'on prendra la précaution de colorer, par exemple, en rouge ceux qui sont parcourus par des courants à haute tension, et en bleu ceux parcourus par des courants continus jusqu'à 6 ou 700 volts. Le sol sur lequel le tableau sera scellé devra former, autant que possible, une plate-forme isolante (asphalte ou bitume). Enfin on doit recommander de bien abriter les câbles reliant le tableau aux machines. Si on les place dans des caniveaux, ceux-ci devront pouvoir être visités facilement et, dans leur construction, on évitera les angles saillants qui pourraient, à la longue, dénuder les câbles.

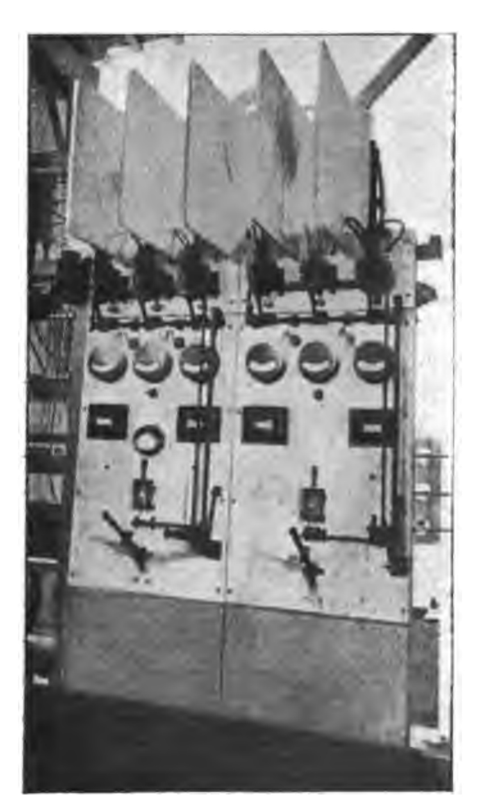


Fig. 46. — Panneaux pour disjoncteurs automatiques triphasés.

Usines hydrauliques. — Dans les usines hydrauliques l'organe moteur est presque toujours constitué par une *turbine*.

Ces appareils sont d'une simplicité remarquable; ils se prêtent admirablement à l'accouplement direct des dynamos et, si l'on prend soin d'arrêter dans une chambre de décantation les graviers que pourrait entraîner l'eau, ne nécessitent que des dépenses d'entretien excessivement faibles.

On peut distinguer les usines hydrauliques à grande chute (maximum 8 à 900 mètres), les usines à moyenne chute (une cinquantaine de mètres) et les usines à faible chute (une dizaine de mètres et au-dessous). Il n'entre pas dans le cadre de cet ouvrage de traiter de la question même des chutes et de leur utilisation. Rappelons seulement que le cas le plus simple qui puisse se rencontrer est celui d'une dénivellation importante existant entre deux points assez voisins d'un cours d'eau. On se contentera, alors, de réunir les deux points considérés par une conduite en acier, débouchant dans l'usine hydraulique. Au sommet, un barrage avec déversoir sera installé pour diriger l'eau dans la conduite et permettre au liquide en excès de s'écouler par sa route naturelle.

Si la disposition des lieux le permet, on augmentera la hauteur de chute en surélevant le barrage ; quelquefois même on créera la chute de toutes pièces, par l'installation d'un barrage de grande hauteur. Mais on ne devra pas oublier qu'un grand barrage est un ouvrage toujours difficile à construire et que, dans son établissement, il est indispensable de se donner un coefficient de sécurité très élevé.

Les chutes d'eau que l'on peut utiliser pour ainsi dire sur place sont généralement rares. Il faut, pour cela, avoir affaire à une cascade ou à un cours d'eau profondément encaissé dans des gorges. Si le ruisseau que l'on veut utiliser est simplement à pente rapide, comme il en existe tant dans les montagnes, on établira, à flanc de coteau, un canal de dérivation à pente très

douce (par exemple 1 millimètre par mètre). La chute disponible par mètre sera la différence de pente du cours d'eau et de la dérivation. Si la première est, par exemple, de 5 centimètres, on gagnera 49 millimètres par mètre, soit 49 mètres pour un kilomètre.

On pourra diminuer beaucoup la longueur du canal de dérivation, quand il s'agira d'un cours d'eau à débit très abondant. En effet, on peut obtenir une même puissance P, avec 100 litres à la seconde tombant de 500 mètres ou avec 10 mètres cubes tombant de 5 mètres. Dans chacun des cas on a bien P = 50 000 kilogrammètres. Mais une usine à grand débit et faible hauteur de chute comporte généralement des travaux très importants qui augmentent souvent, d'une façon gênante, le capital de premier établissement à investir dans l'entreprise.

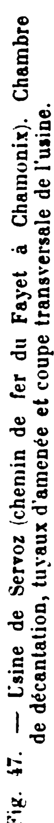


Fig. 47. — Usine de Servoz (chemin de fer du Fayet à Chamonix). Chambre de décantation, tuyaux d'amenée et coupe transversale de l'usine.

Une turbine se compose de deux parties : le *distributeur*, couronne fixe, munie d'aubes qui divisent la masse fluide en filets et la dirigent sur une autre couronne mobile, appelée *récepteur*.

Si le distributeur et le récepteur sont montés concentrique-

ment autour de l'arbre de rotation, la turbine est dite *radiale*, avec cette autre distinction qu'elle est *centrifuge* quand le récepteur entoure le distributeur, et *centripète*, quand le distributeur est monté à la périphérie du distributeur.

Lorsque le distributeur est au-dessus du récepteur, la turbine rentre dans la catégorie des turbines *parallèles*.



Fig. 48. — Usine de Servoz (chemin de fer du Fayet à Chamonix). Vue générale des tuyaux d'amenée et de l'usine.

Enfin on a beaucoup employé, dans ces dernières années, des turbines *mixtes* ou *américaines* qui sont une combinaison des types centripètes et parallèles.

En Europe, on se sert surtout dans les usines pour traction de turbines radiales, en les montant soit horizontalement (axe horizontal) soit verticalement (axe vertical).

La première disposition est celle qui est le plus fréquemment employée. Elle permet, en effet, d'employer des dynamos d'un

type ordinaire et facilite grandement la surveillance, la turbine et la dynamo étant au même niveau. L'entraînement de la génératrice se fait par un plateau avec accouplement élastique, genre Raffard ou autre, et à des vitesses qui peuvent atteindre facilement de 1 000 à 1 200 tours. Il suffit, alors, de dynamos de faible volume pour obtenir une grande puissance électrique.

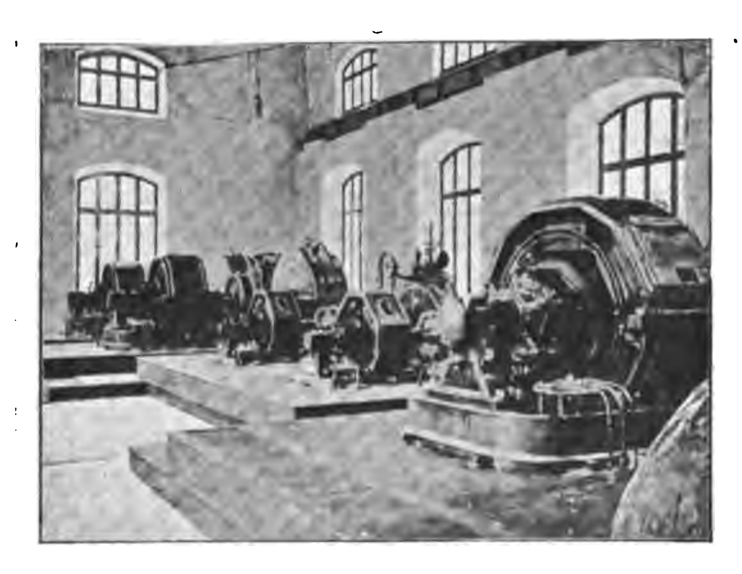


Fig. 49. — Usine de Servoz (chemin de fer du Fayet à Chamonix). Vue intérieure de l'usine.

Comme rentrant dans ce genre, nous signalerons :

(*a*) Les turbines des deux usines électriques de la ligne du Fayet à Chamonix. Dans l'usine de Servoz (chute de 40 m.) (fig. 47 et 48) il est fait usage de turbines centripètes, actionnant directement une dynamo à courant continu à 6 pôles (fig. 49). La vitesse de la turbine varie de 615 tours à vide à 448 tours pour une puissance maxima de 448 chevaux Dans les mêmes conditions le courant de la dynamo passe de 0 à 440 ampères. Il est à remarquer que la dynamo a une excitatrice spéciale, tout en étant munie

d'un second enroulement dans lequel passe une fraction du courant qu'elle produit. Par suite, l'excitation augmente quand la vitesse diminue et maintient la tension à 550 volts. A l'usine des Chavants (chute de 139 m.) (fig. 50 et 51) on a employé une disposition analogue, mais les turbines (au nombre de 4) sont centrifuges au lieu d'être centripètes. Leur vitesse varie de 450 tours

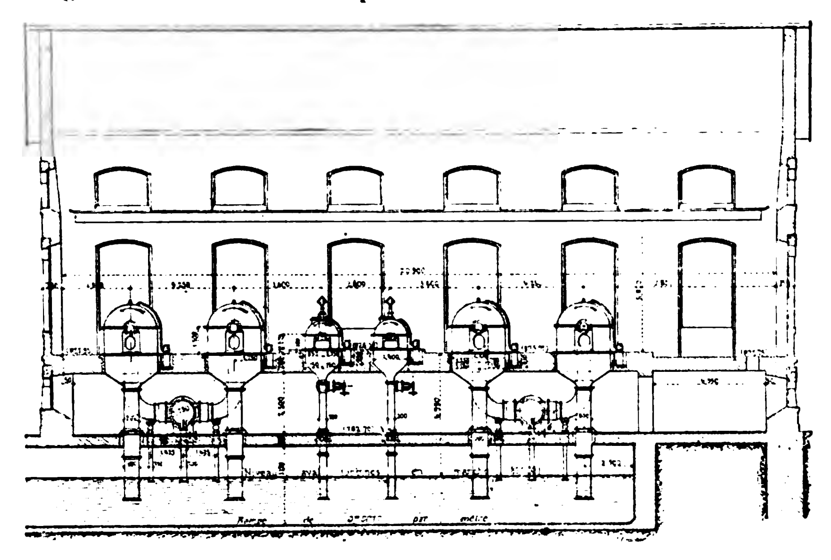


Fig. 50. — Usine des Chavants (chemin de fer du Fayet à Chamonix). Coupe longitudinale.

à pleine charge jusqu'à 600 tours à vide. Les excitatrices, qui occupent la partie médiane de l'usine, sont constituées par deux turbines à régulateur, de 60 chevaux, actionnant des dynamos de même puissance.

(*b*) Les *turbines du chemin de fer de la Jungfrau* sont au nombre de 4 savoir : 2 de 500 chevaux, (hauteur de chute 35 mètres), et 2 de 800 chevaux (fig. 52). Ces dernières offrent cette particularité (système Francis) que, sur le pourtour du distributeur, se trouvent des palettes mobiles qui peuvent s'incliner plus ou moins sous l'action d'un servo-moteur que met en mouvement le régulateur,

Les dynamos sont des alternateurs à fer tournant produisant du courant triphasé à la tension de 7000 volts. La vitesse de rotation est de 380 tours par minute.

c) Les turbines du chemin de fer de la Valteline (usine de Morbegno) offrent cette particularité qu'elles mettent en mouvement des alternateurs produisant des courants triphasés à 20000 volts (fig. 53). Leur puissance peut atteindre 1500 kilowatts. Elles fonctionnent sous une chute de 35 mètres et tournent à 150 tours. Les turbines sont du système Ganz, type centripète. En même temps qu'un alternateur, elles actionnent une excitatrice, montée sur le même arbre.

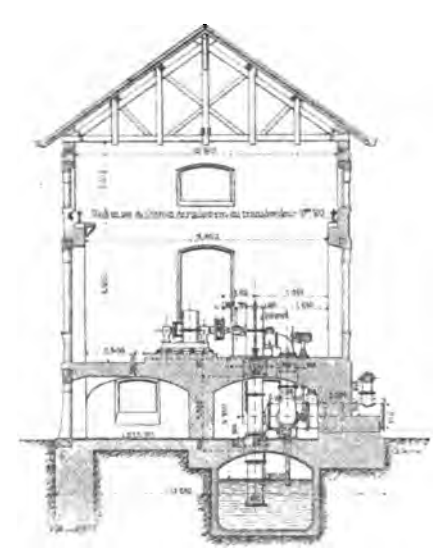


Fig. 51. — Usine des Chavants (chemin de fer du Fayet à Chamonix). Coupe transversale.

Lorsque la turbine est à axe vertical il faut employer des dynamos avec bâtis spéciaux car celles-ci sont couchées horizontalement. Un exemple classique de ce système se rencontre dans l'usine d'Arthaz, qui alimente le chemin de fer du Salève (fig. 54). Les dynamos produisent 275 ampères à 600 volts et sont à grand diamètre (3,20 m.). Pour cette dernière raison elles ne tournent, qu'à 45 tours, vitesse de la turbine. La figure 55 montre une dynamo analogue, mais d'un type plus récent, spécialement combiné par la maison Œrlikon.

Nous citerons, enfin, l'application grandiose qui a été faite du système à axe vertical dans les usines du Niagara. Toutefois, il est bon d'ajouter qu'il s'agit là d'une installation présentant des conditions tout à fait spéciales, en raison de la situation particu-



Fig. 52. — Turbines à axe horizontal du chemin de fer de la Jungfrau. (Usine de Lauterbrunnen).

lière de la chute. Celle-ci est tout à fait brusque et, d'autre part,

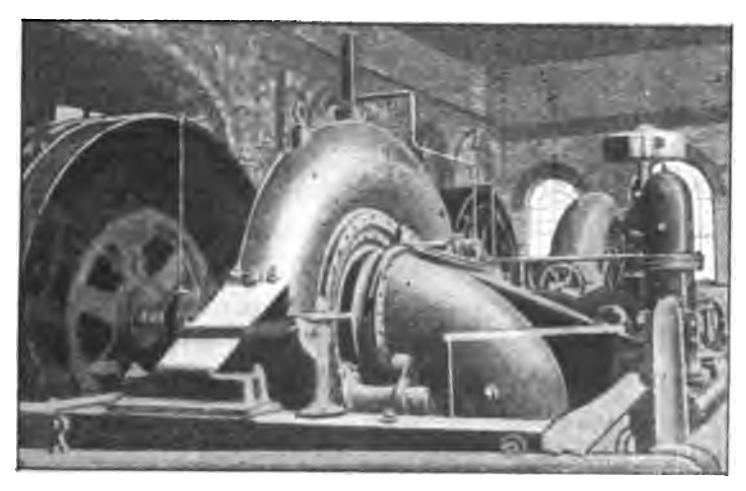


Fig. 53. — Turbines du chemin de fer de la Valteline. (Usine de Morbegno.)

l'encaissement du cours d'eau, à l'aval, ne permettait pas de placer

les installations hydrauliques au niveau inférieur. On a dû, à partir du niveau supérieur, creuser de grandes chambres verticales au fond desquelles se trouvent les turbines (système Francis). Les dynamos sont au niveau du sol et leur commande se fait par un arbre vertical, long de 44 mètres (fig. 56). Ces dynamos



Fig. 54. — Dynamo pour turbine à axe vertical (chemin de fer du Salève. Usine d'Arthaz).

qui tournent à 250 tours, ont une puissance de 5 000 chevaux (fig. 57). Deux usines, pour 100 000 chevaux, ont déjà été installées sur la rive américaine et l'on s'occupe d'en créer une troisième, encore plus puissante sur la rive canadienne. Les unités seront de 10 000 chevaux. Les dynamos seront à inducteurs mobiles et produiront du courant triphasé à la tension de 12 000 volts[1] (fig. 58, 59, 60 et 61).

Il est clair que des installations analogues à celles du Niagara sont tout à fait exceptionnelles. La plupart des usines hydrauliques pour traction présentent, au contraire, un caractère de sim-

[1] *Génie civil*, 3 janvier 1903.

plicité beaucoup plus marqué et, à ce point de vue, les construc-

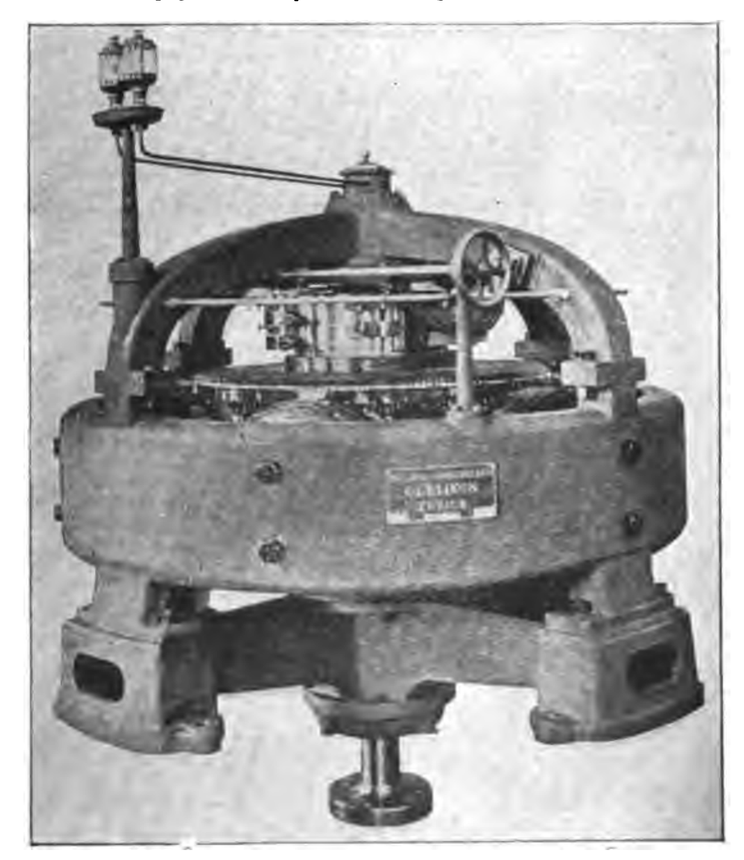


Fig. 55. — Dynamo pour turbine à axe vertical. Type des ateliers d'Œrlikon.

teurs ont généralement donné la préférence au type horizontal qui permet de réunir toutes les machines suivant un même niveau.

C'est également le désir de simplifier encore les installations hydrauliques qui a conduit à la création d'un type nouveau dans lequel l'eau agit non plus par réaction, mais par choc. Ce type s'applique spécialement aux grandes chutes. La turbine se compose, alors, d'une simple roue munie d'augets, montés à la péri-

phérie. Nous trouverons plus loin une disposition analogue, en parlant des turbines à vapeur. Les figures 62 et 63 montrent une de ces roues-turbines (système Pelton) actionnant un alternateur de 500 chevaux. Le peu d'encombrement d'un tel moteur est remarquable, la roue n'ayant que 1,20 m. de diamètre. On fera d'ailleurs observer que l'on pourrait encore augmenter la puissance de la machine en projetant

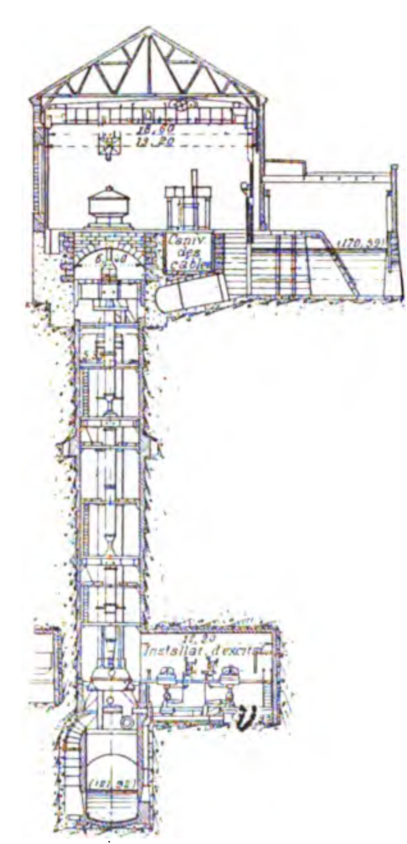


Fig. 56. — Turbines à axe vertical des usines du Niagara (usines américaines) (5000 chevaux).

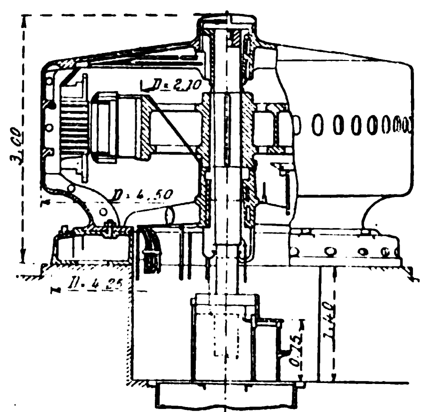


Fig. 57. — Alternateur commandé par les turbines de 5000 chevaux.

l'eau non pas par deux ajutages, comme l'indique la figure, mais par un plus grand nombre.

Les turbines, à côté de leurs grands avantages, ont un inconvénient sur lequel il faut insister. C'est leur tendance à l'emballement, quand la charge diminue brusquement. Bien que l'on puisse corriger cet inconvénient par l'emploi de régulateurs, on fera bien

de calculer la machine de telle façon qu'elle puisse supporter la vitesse maxima correspondant à la marche à vide. Cette précau-

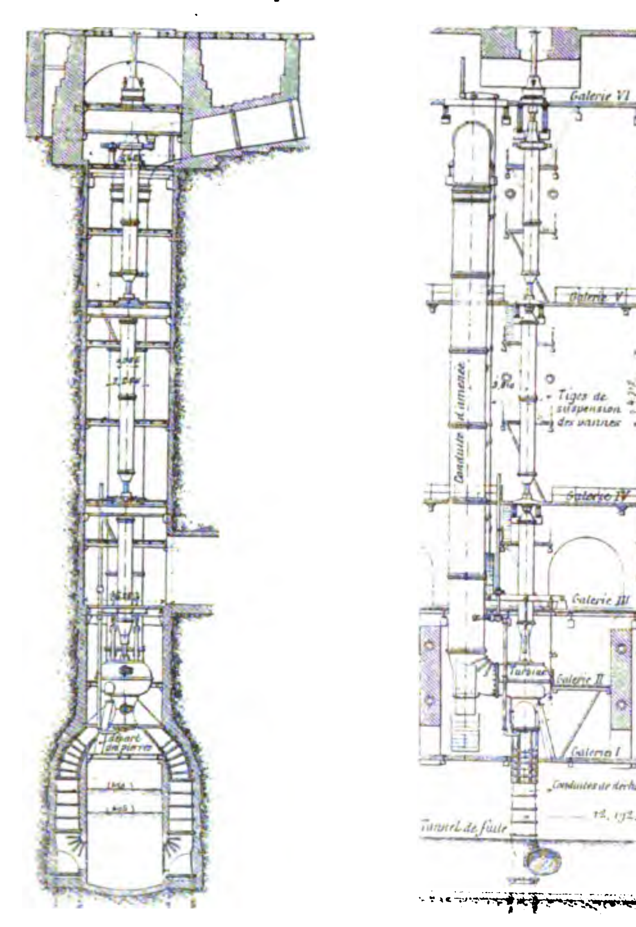


Fig. 58. — Turbines à axe vertical des nouvelles usines du Niagara (10000 chevaux).

Fig. 59. — Nouvelles usines du Niagara. Coupe longitudinale de la chambre des turbines.

tion se justifie amplement par ce fait que les régulateurs pour turbine n'ont ni la souplesse, ni l'instantanéité des régulateurs de machines à vapeur. Ils doivent agir en effet sur des organes lourds

et résistants (vannes de fermeture des tuyaux d'amenée). Et si, d'autre part, une action trop brusque intervient, il peut se pro-

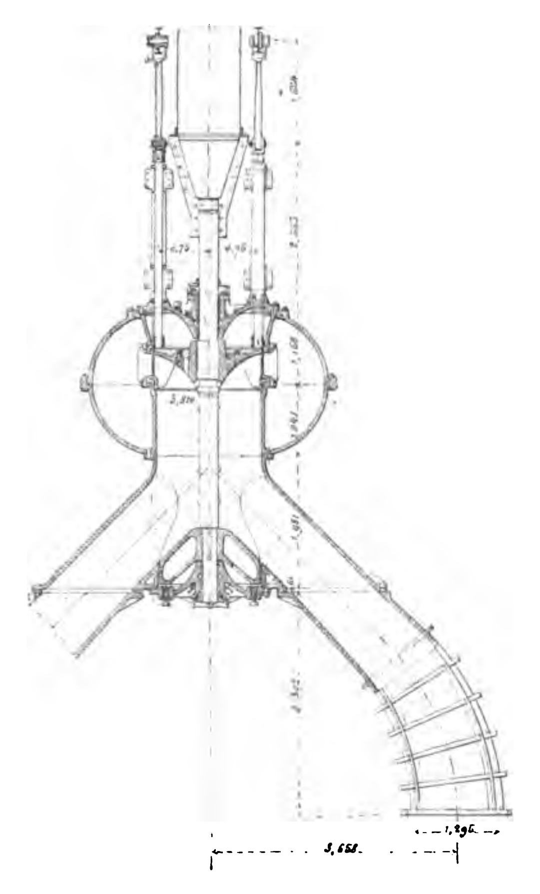


Fig. 60. — Nouvelles usines du Niagara. Turbine de 10 000 chevaux.

duire des « coups de bélier » suffisants pour crever les conduites les plus résistantes.

Heureusement que, dans les usines pour traction, on peut avoir recours à l'électricité pour effectuer toutes ces manœuvres. Le régulateur n'intervient plus que pour lancer le courant dans l'ap-

pareil chargé spécialement de la manœuvre des vannes. N'ayant

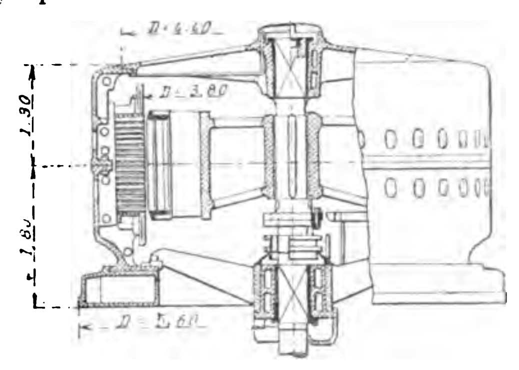


Fig. 61. — Nouvelles usines du Niagara. Alternateur commandé par les turbines de 10 000 chevaux.

aucun effort mécanique à exercer, il peut agir avec beaucoup de sensibilité.

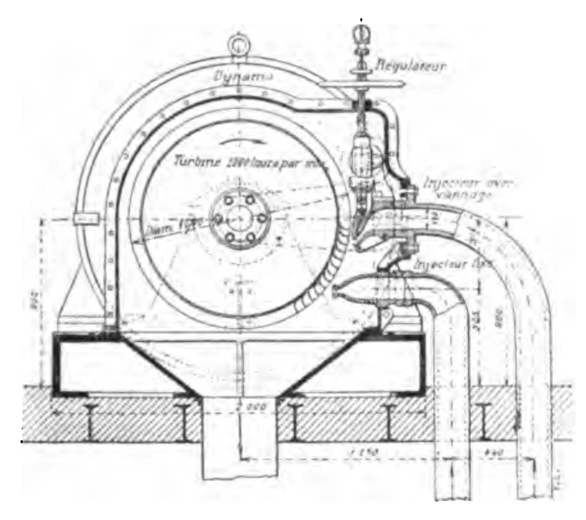


Fig. 62. — Turbine pour chute de grande hauteur. (Coupe perpendiculaire à l'axe de la turbine).

Il n'en est pas moins certain que, même avec le secours de l'électricité, on n'a pas toujours résolu d'une façon très heureuse

le problème de la régulation des turbines et c'est un point qui devra mériter une attention toute spéciale, quand on aura une installation de ce genre à surveiller ou à exécuter.

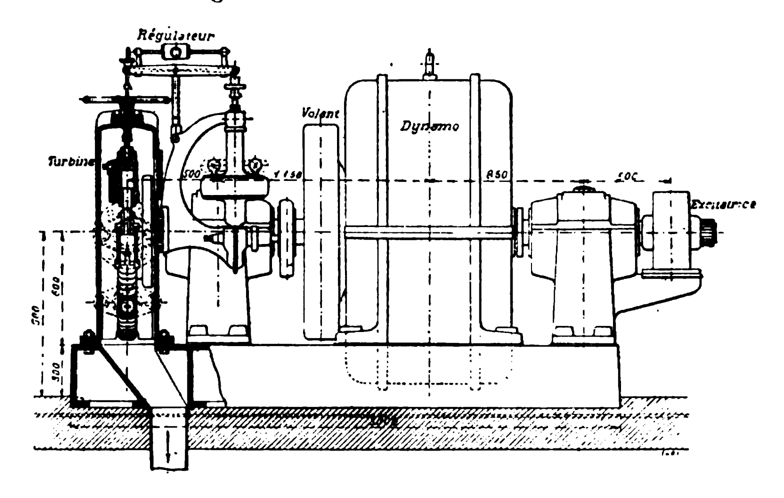


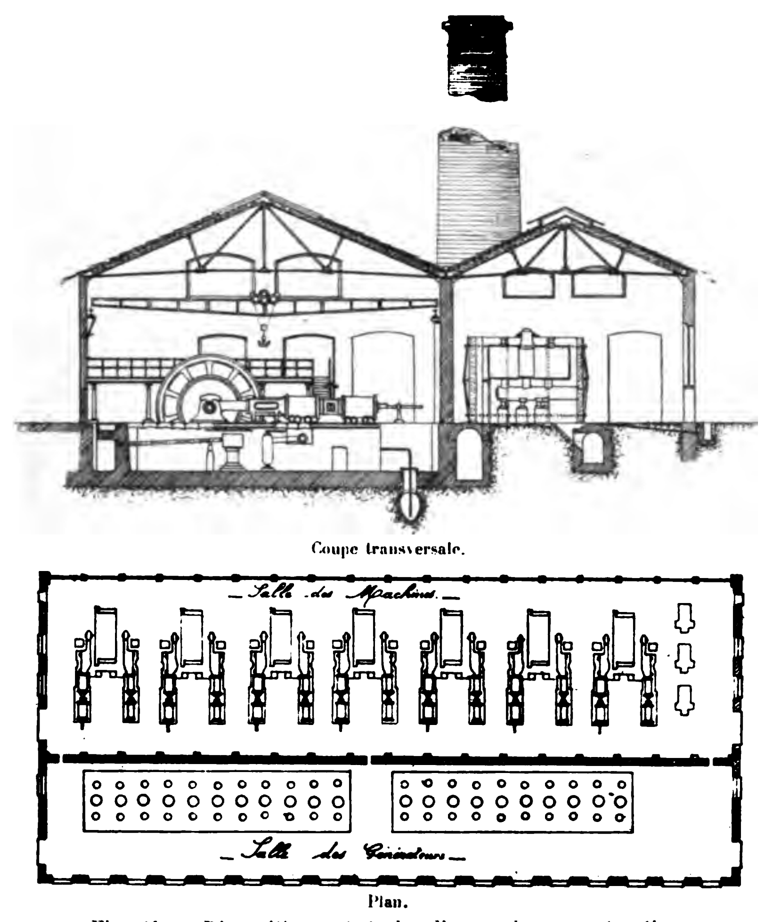
Fig. 63. — Turbine pour chute de grande hauteur. (Coupe longitudinale.)

Usines à vapeur. — Une usine à vapeur comprend deux parties bien distinctes : la chaufferie pour la production de la vapeur et la salle des moteurs.

Ces salles sont généralement placées côte à côte, les bâtiments étant établis parallèlement et à peu près de plain-pied. Nous disons à peu près, car la nécessité de placer sous le plancher de la salle des moteurs la tuyauterie et généralement les appareils pour la condensation oblige à disposer, sous la salle des moteurs, d'un sous-sol assez haut, alors que les chaudières reposent sur des fondations massives (fig. 64). On doit, d'ailleurs, être très large dans les dimensions à donner au sous-sol dont, sans cela, la température deviendrait intenable et rendrait toute surveillance extrêmement difficile. Il faut également en soigner la ventilation.

Les bâtiments se font très économiquement en fer et briques ; il sera indispensable de disposer les lanternaux de manière à éviter

toute chute d'eau sur les machines, principalement sur les dynamos génératrices et le tableau de distribution. Dans un ordre



Coupe transversale.

Plan.

Fig. 64. — Dispositions générales d'une usine pour traction.

d'idées analogue, on fera attention aux condensations qui peuvent se produire sur la toiture; elles sont occasionnées par la vapeur que laissent échapper les soupapes et les joints des tuyaux et qui vient en contact avec des parties que refroidit l'air extérieur. Pour les éviter on a souvent remplacé les combles

ordinaires par des terrasses cimentées (ciment volcanique ou autre) qui forment alors une couche mauvaise conductrice de la chaleur (fig. 65).

Dans la salle des machines et à une hauteur convenable peut circuler, de bout en bout, un pont roulant. C'est là un organe

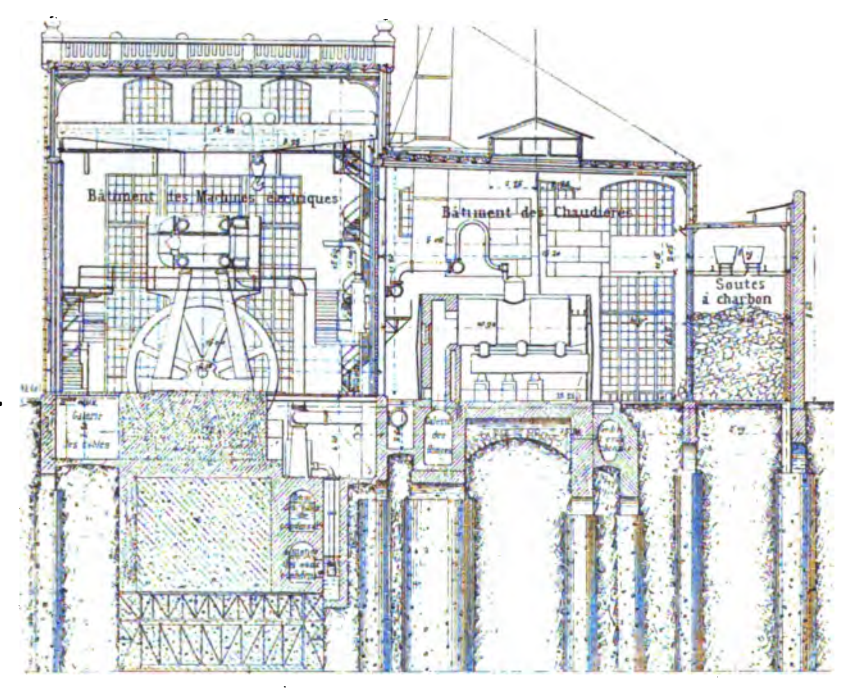


Fig. 65. — Usine avec couverture en terrasse. (Chemin de fer métropolitain de Paris).

indispensable dans une grande usine et l'on ne conçoit pas comment, sans cet appareil, on pourrait procéder ultérieurement au remplacement des grosses pièces des machines. Il rend également des services inappréciables pour le montage et l'on ne saurait trop recommander à ceux qui ont à construire des usines neuves de bien prendre leurs dispositions pour que, au moment où les bâtiments se terminent, le pont roulant soit prêt à fonctionner.

Pour la salle des chaudières un pont roulant n'est pas nécessaire, mais il faut que l'on dispose de toute la place voulue pour que l'on puisse aisément visiter les foyers, les carnaux, retirer les tubes, etc.

Celle salle doit contenir également une galerie pour l'évacuation des cendres et mâchefers ; cette galerie communique avec les foyers par des couloirs. On reçoit les cendres et mâchefers dans des wagonnets et on les évacue soit à l'aide d'un monte-charge, soit en poussant les wagonnets à l'extérieur, à l'aide d'une rampe d'accès.

Les chaudières employées dans les usines pour traction sont de types assez variables ; elles peuvent différer sensiblement de celles qui sont en usage dans les usines où l'électricité produite alimente un réseau d'éclairage parce que, dans ce dernier cas, il faut pouvoir mettre les chaudières rapidement en pression, ce qui arrive, par exemple, si le temps s'assombrit subitement. Au contraire un chemin de fer effectue un service journalier à peu près continu et, pendant au moins une vingtaine d'heures par jour, souvent même pendant vingt-quatre, l'usine doit travailler dans sa pleine charge. Il importe donc d'avoir des chaudières robustes, économiques et ayant une certaine élasticité leur permettant de faire face aux à-coups inévitables de la consommation.

En France, on emploie généralement des chaudières semi-tubulaires, à grand volume d'eau. On ne dépasse pas ordinairement, comme unité, des puissances de 300 à 350 chevaux. Par conséquent pour une machine de 1 500 kilowatts, par exemple, soit 2 040 chevaux, il faudra installer de 6 à 7 chaudières. L'emplacement longitudinal qu'elles occuperont sera alors plus considérable que celui correspondant aux moteurs et l'on devra renoncer à cette disposition très simple qui consiste à monter les chaudières sur une seule rangée parallèle au bâtiment des moteurs. On pourra, dans ce cas, monter les chaudières sur deux rangées se faisant face, à la condition de ménager entre ces deux rangées un espace suffisant pour que les hommes ne soient pas incom-

modés par la chaleur et que, d'autre part, on puisse facilement retirer les tubes des chaudières.

A l'étranger, les chaudières semi-tubulaires sont moins en hon-

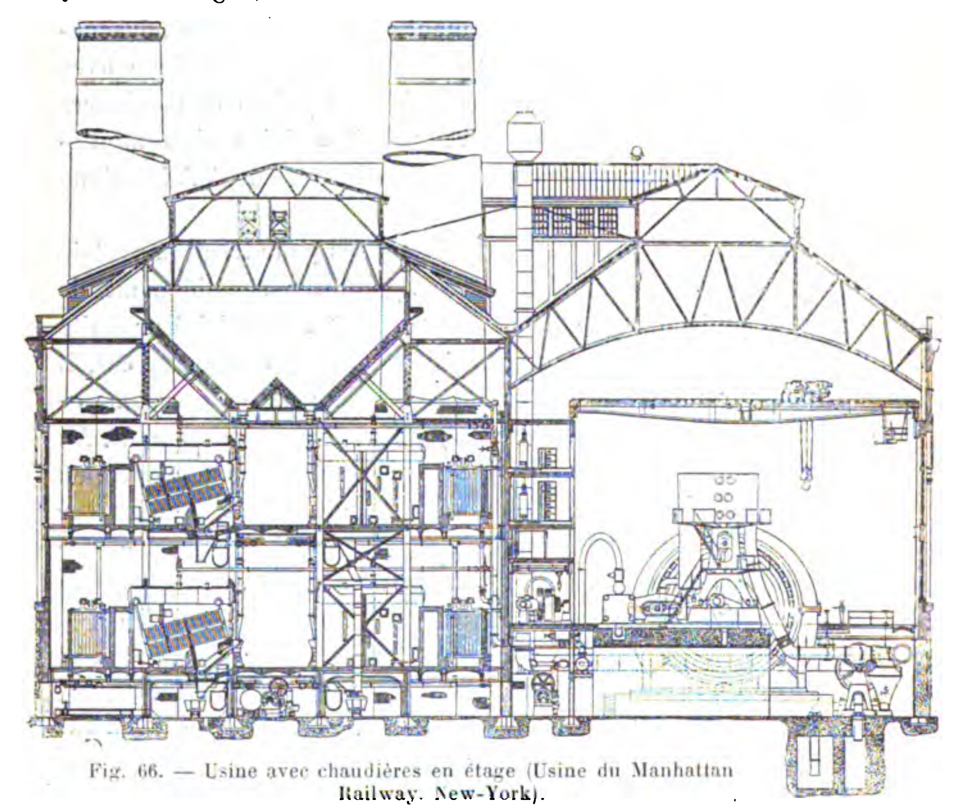


Fig. 66. — Usine avec chaudières en étage (Usine du Manhattan Railway. New-York).

neur. On leur préfère généralement les chaudières Galloway (Angleterre) et les chaudières avec tubes et réservoirs d'eau (Amérique). Mais il est sûr que, dans ce dernier cas, on a à effectuer des dépenses d'entretien plus considérables. Ce que l'on peut dire, cependant, c'est que les chaudières de ce dernier type sont moins pesantes. Mais la question du poids intervient surtout lorsque les chaudières doivent être placées en étage (fig. 66). Or, une telle disposition peut être considérée comme exceptionnelle, car

la facilité que l'on a, maintenant, d'alimenter un chemin de fer par transport de force, permet réellement de placer l'usine génératrice en un point où le montage des chaudières en étage ne s'impose plus. Les Américains, qui plaçaient volontiers leurs chaudières sur deux et même trois étages, ont maintenant une tendance marquée à revenir aux chaudières montées de plain-pied.



Fig. 67. — Élément d'un transporteur de charbon.

Une des questions qui doivent également intervenir pour le choix de l'emplacement d'une usine est celle de l'eau. Bien des accidents sont arrivés par suite de l'emploi d'une mauvaise eau d'alimentation, occasionnant dans les chaudières des dépôts calcaires qui provoquent à un moment donné des « coups de feu. » On peut, il est vrai, remédier à la défectuosité de l'eau, en traitant celle-ci dans des *épurateurs*. Mais ces appareils sont encombrants et la dépense d'épuration finit, en raison du grand volume d'eau employé, par n'être pas négligeable.

L'eau sert, dans une usine, non pas seulement pour l'alimentation, mais aussi pour la condensation, car on ne conçoit pas une grande usine marchant seulement à condensation libre. Or la condensation exige de grands volumes d'eau (environ 30 fois celui de l'alimentation) et s'il fallait acheter cette eau à un prix élevé ou l'extraire de puits à débits incertains, on s'exposerait, pour la suite, à des déboires et à de graves ennuis. Le palliatif qui consiste à refroidir l'eau de condensation, après usage, et à s'en servir de nouveau, quand elle est revenue à la température normale, ne peut être envisagé que pour une installation modeste. Une grande usine pour traction doit toujours disposer d'une quantité d'eau pour ainsi dire illimitée et il est désirable, pour obtenir

un tel résultat, de l'établir à proximité d'une rivière ou d'un canal.

L'apport et la manutention du charbon sont également des

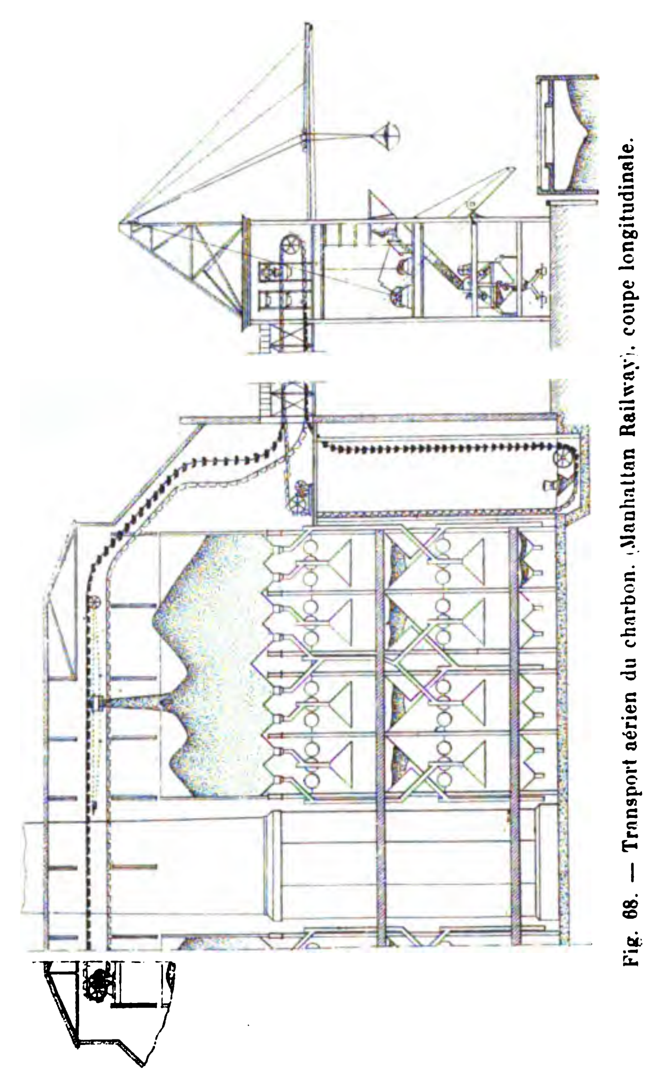


Fig. 68. — Transport aérien du charbon. (Manhattan Railway), coupe longitudinale.

facteurs qui doivent intervenir avec le plus de poids pour le choix de l'emplacement de l'usine. Les usines pour traction sont de

grandes consommatrices de charbon, d'abord parce qu'il n'est

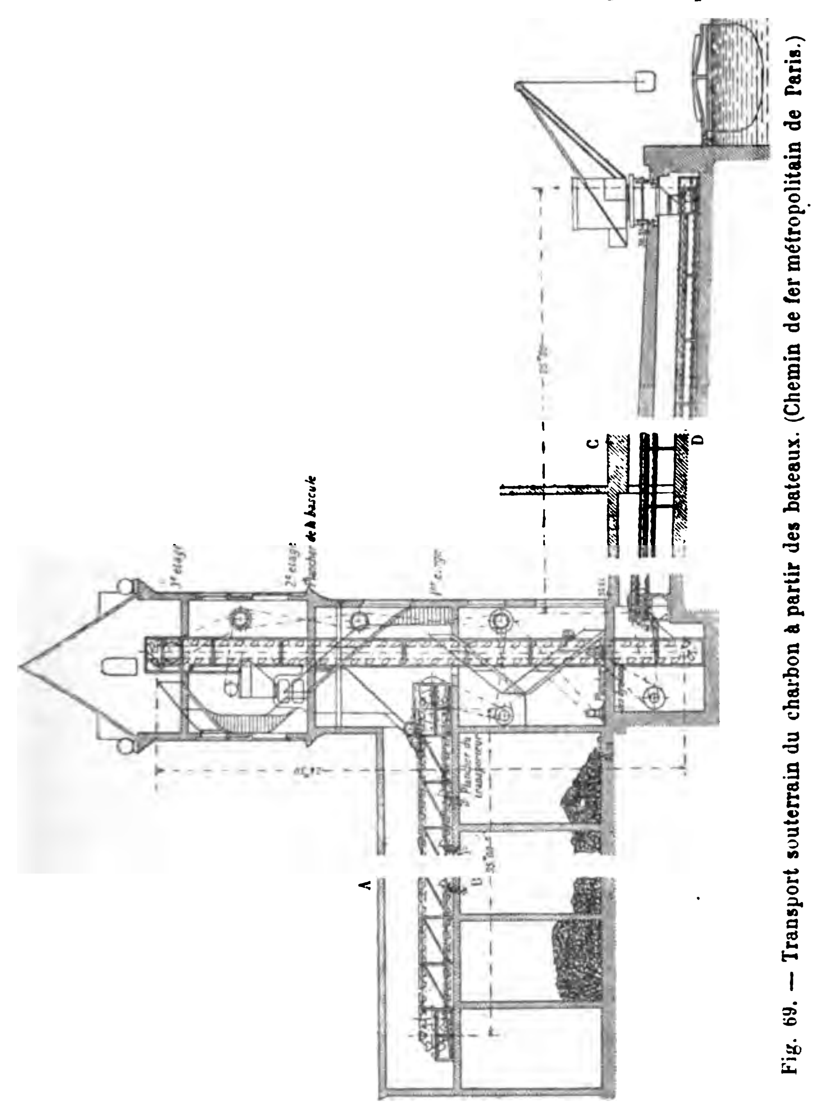


Fig. 69. — Transport souterrain du charbon à partir des bateaux. (Chemin de fer métropolitain de Paris.)

pas besoin d'un réseau très étendu pour nécessiter des usines de plusieurs milliers de chevaux, et ensuite parce que l'usine tra-

vaille, pour ainsi dire, d'une façon continue. L'électricité n'est, en somme, qu'un intermédiaire, transformant en travail mécanique, dans les moteurs des trains, l'énergie contenue dans le charbon brûlé sous les chaudières. C'est ce charbon qui, en réalité, effectue la traction des trains et l'on conçoit, ce qui sera clairement établi plus tard, qu'il doive occuper une place prépondérante dans les dépenses de traction.

Tout ce qui tend à diminuer le prix du charbon doit donc être pris en très sérieuse considération par un directeur d'usine, et des dispositions réalisées à cet effet dépend souvent le succès définitif d'une exploitation électrique.

Comme premier désideratum, il faut pouvoir éliminer tout transport par charrettes et se donner la possibilité de recevoir le charbon directement soit par bateau, soit par wagon. Dans ce dernier cas, on pourra envisager l'emploi de wagons spéciaux s'ouvrant par en dessous (analogues, par exemple, à ceux dont on se sert pour les usines à gaz) et qui seront amenés sur une estacade de déchargement. Le charbon ainsi approvisionné sera repris par des wagonnets et amené par voie ferrée jusque devant les chaudières. On réduira à très peu de chose ce transport supplémentaire, en établissant l'estacade en bordure même de la salle des chaudières.

Si le charbon arrive par bateau, l'emploi de grues électriques sera tout indiqué. Mais, généralement, le combustible devra encore franchir une assez grande distance pour parvenir à l'usine, par suite de l'existence, le long du cours d'eau, de quais, de chemins de halage ou de voies de communication. On aura alors recours à un transporteur soit aérien (fig. 67 et 68), soit souterrain (fig. 69), le premier devant être préféré au second, parce qu'il est de surveillance plus commode. Il est, d'autre part, assez difficile de mettre un transporteur souterrain à l'abri des crues, sans compter que la poussière produite par le charbon en mouvement peut être excessivement gênante pour les ouvriers chargés de la surveillance des appareils.

Le transporteur amène ainsi mécaniquement le charbon jusque dans l'usine et le déverse soit devant les chaudières soit, ce qui

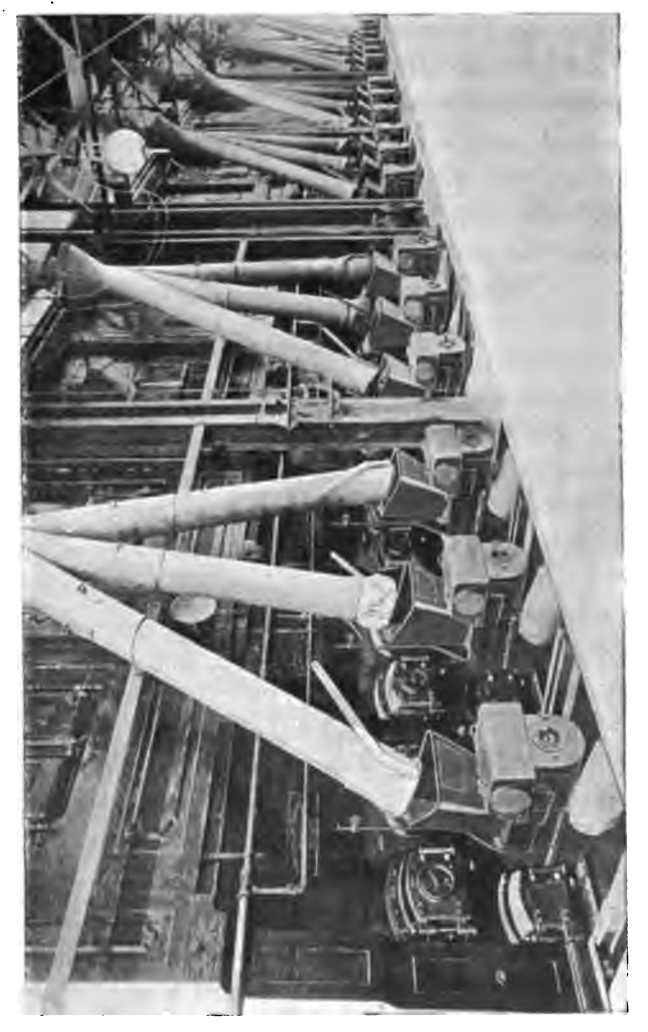


Fig. 70. — Appareils pour chargement automatique des foyers.

vaut mieux, dans des soutes diposées en étage et d'où descendent de grands tuyaux en tôle aboutissant devant chaque chaudière.

Ces tuyaux sont fermés par une vanne que l'on manœuvre à l'aide d'un levier et permettent de faire écouler très commodément et instantanément la quantité de charbon dont on a besoin.

Ce système se concilie très bien avec le chargement automatique des chaudières, les tuyaux aboutissant, alors, dans l'entonnoir qui alimente les appareils de chargement (fig. 70).

Le chargement automatique des foyers est un complément d'installation désirable dans une grande usine, où il faut toujours chercher à réduire l'importance de la main-d'œuvre. Certains foyers automatiques procurent même une économie de combustible ; mais cet avantage ne doit pas être obligatoirement recherché, l'automaticité du chargement étant par lui-même une amélioration déjà très notable.

Généralement on est assez sceptique en matière de foyers à chargement automatique, beaucoup d'essais infructueux ayant été tentés. Il est vrai qu'à l'heure actuelle il n'existe pas de foyer automatique « omnibus », c'est-à-dire pouvant s'appliquer à toutes les chaudières. Il faut, parmi les nombreux appareils qui ont été imaginés par les inventeurs, faire un choix en tenant compte non seulement des dispositions intérieures des foyers, mais aussi des qualités physiques et chimiques du charbon qui doit être le plus généralement brûlé.

Il est à remarquer que les foyers automatiques sont généralement fumivores. Cet avantage spécial n'est pas à dédaigner, lorsque l'usine est installée dans une agglomération importante et l'on peut éviter ainsi les procès qu'occasionnent souvent les fumées épaisses dégagées par certains charbons.

L'évacuation des fumées et des produits gazeux de la combustion se fait généralement par de hautes cheminées en brique, dont le diamètre et la hauteur se calculent d'après des formules bien connues. Mais, de ce côté, de sérieuses améliorations peuvent être obtenues en substituant au tirage naturel le *tirage forcé* (fig. 71). Les cheminées se réduisent alors à un tuyau en

tôle d'une dizaine de mètres, dans lequel on aspire, à l'aide d'un ventilateur formant injecteur, les gaz des foyers. Un grand nombre d'usines américaines emploient maintenant le tirage forcé. La théorie et la pratique démontrent qu'un tel système est finalement bien plus économique que le tirage ordinaire et il n'y a aucune raison pour qu'il ne s'étende pas également aux usines européennes.

Nous avons cru devoir donner un certain développement à tous ces détails parce que l'expérience montre qu'ils sont d'une grande importance pour une exploitation électrique. Très souvent l'électricité ne peut lutter contre la vapeur qu'à la condition d'être produite très économiquement et quelques millimes, gagnés sur le prix de revient du kilowatt-heure, peuvent finalement, pour une année, se chiffrer par une amélioration notable du coefficient d'exploitation, la dépense d'électricité ayant, dans les dépenses totales d'exploitation, une place prépondérante.

Donc, tout ce qui pourra contribuer à diminuer la dépense de combustible devra, dans une usine, toujours être examiné de très près.

Fig. 71. — Cheminée pour tirage forcé (*Prat*).

Dans cet ordre d'idées on recherchera à utiliser les chaleurs perdues pour réchauffer l'eau d'alimentation.

Les *économiseurs*, que l'on a imaginés dans ce but, se composent généralement de tubes en fonte dans lesquels passe l'eau d'alimentation et à travers lesquels circulent les gaz chauds et les fumées, avant de se rendre dans la cheminée. Ces tubes se couvrent rapidement de suie qui est, comme on le sait, mauvaise conductrice de la chaleur. On l'enlève à l'aide de grattoirs que met en mouvement un petit moteur. De la sorte on peut gagner de 60 à 70°; autrement dit on augmente ainsi de 60 à 70° la température de l'eau d'alimentation.

Pour envoyer l'eau d'alimentation dans les chaudières, malgré la pression qui y règne, on se sert généralement de « petits chevaux », moteurs à vapeur à marche lente, qui actionnent des pompes foulantes. Les *injecteurs* sont plutôt employés comme secours, leur rendement étant moins satisfaisant.

Nous ne nous étendrons pas longuement sur la *tuyauterie*, bien que la façon dont elle est établie puisse avoir une grande influence sur le fonctionnement ultérieur de l'usine. On ne doit pas hésiter à s'adresser, pour cette partie des installations, à une maison de premier ordre. En outre, toutes les dispositions seront prises pour pouvoir isoler rapidement telle ou telle chaudière, telle ou telle partie du collecteur de vapeur. Les accidents, dans une salle de chauffe, ont toujours quelque chose d'affolant et il faut que les chauffeurs puissent localiser facilement et sans hésitation toute avarie fortuite.

Les machines à vapeur pour traction doivent avoir comme qualité primordiale une grande élasticité et une régularité de marche à peu près parfaite. Tel train qui ne consommera en palier qu'une cinquantaine de chevaux, ou pas du tout s'il est à l'arrêt ou dans une pente, demandera brusquement à l'usine un millier de chevaux pour démarrer ou pour gravir une rampe accentuée. Il ne faudra pas que, sous cet énorme effort, la machine puisse ralentir, car alors le voltage de la génératrice s'abaisserait. Ce serait demander beaucoup à la seule action de la vapeur sur le piston. On lui adjoint l'effet régulateur d'un gros volant qui emmagasine une force vive considérable et qui tend à la restituer, dès qu'un commencement de ralentissement se manifeste. C'est ce qui explique pourquoi, dans les usines électriques, les machines à vapeur sont munies de volants énormes (parfois jusqu'à 70 tonnes), grâce auxquels les à-coups inévitables de la consommation sont supportés très aisément (fig. 72). Ils facilitent également, dans le cas du courant alternatif, la mise en parallèle des alternateurs.

Nous avons vu, en parlant des dynamos, que ces machines com-

portaient des vitesses de rotation plutôt élevées, dépassant sensiblement celle des machines à vapeur employées le plus couramment dans l'industrie. Aussi, dans les premières installations électriques, avait-on actionné les dynamos par courroies, complication assez grande et absorbant du travail inutilement. Les constructeurs avaient, il est vrai, cherché à créer des machines à grande vitesse et c'est à ce type qu'il faut rattacher les

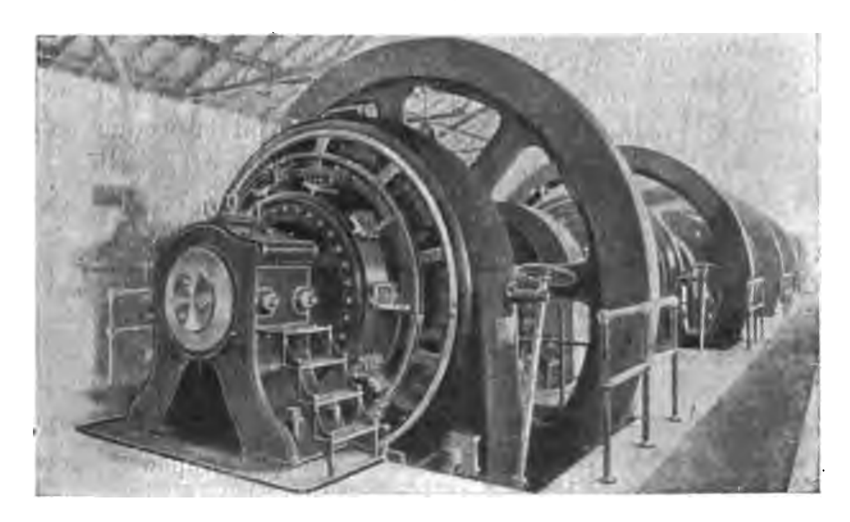


Fig. 72. — Dynamo avec commande directe et grand volant.

machines Willans qui jouissent d'une certaine réputation; mais, dès que l'on atteint une certaine puissance, les masses à mettre en mouvement prennent une importance trop grande, sans compter que de trop fortes vitesses ne sont guère compatibles avec un bon rendement. Aussi s'est-on résigné à rester dans des allures lentes et c'est du côté des dynamos que l'on a cherché une diminution de vitesse, afin d'arriver à un accouplement direct des dynamos et des moteurs.

Le problème a été pour ainsi dire résolu de lui-même par l'emploi de grosses unités, combinées avec la multiplication des

pôles. Une rotation complète équivaut, dans ce cas, à n rotations d'une dynamo bipolaire, si $2n$ est le nombre des pôles de l'unité. La conséquence est que l'on a pu obtenir des dynamos tournant à une soixantaine de tours par minute, ce qui est largement suffisant dans la pratique, attendu que des vitesses très convenables pour des machines à vapeur sont de 70 à 80 tours par minute.

L'accouplement direct des machines à vapeur et des dynamos est devenu, par suite, une chose courante et l'on ne conçoit pas aujourd'hui qu'une grande usine puisse être organisée autrement.

Nous avons beaucoup insisté, en parlant des chaudières, sur la nécessité de réduire autant que possible le coût de production de la vapeur.

Cette précaution ne peut avoir l'effet qu'il convient qu'autant que, concurremment, on aura porté son choix sur des machines à vapeur ayant un bon rendement, c'est-à-dire consommant, par kilowatt-heure, la plus petite quantité de vapeur possible.

L'amélioration du rendement des machines à vapeur a fait l'objet, surtout depuis les multiples applications de l'électricité, des efforts combinés de tous les constructeurs. Le gain réalisé n'a pas été très surprenant, car la machine à vapeur est, par elle-même, un instrument fort imparfait; mais les économies que les nouveaux types ont fait réaliser ont cependant suffi, dans bien des cas, pour permettre d'étendre encore davantage le domaine de l'électricité. C'est surtout par l'emploi de *machines Compound* et de *machines à triple expansion* que le résultat cherché a été atteint. Dans les machines Compound, la vapeur, produite par les chaudières, à une pression d'une dizaine de kilogrammes, arrive, dans un premier cylindre, à cette pression, où elle effectue un premier travail, sans toutefois que sa pression, à la sortie, s'abaisse au-dessous de 5 à 6 kilogrammes; puis, elle passe dans un second cylindre où elle achève de se détendre. Ces deux cylindres sont souvent disposés de part et d'autre du volant et de la dynamo et les manivelles sont respec-

tivement calées à 90°, ce qui facilite le passage des points morts.

Dans la machine à triple expansion la vapeur doit arriver à la pression de 12 à 14 kilogrammes et elle se détend successivement dans trois cylindres. La capacité de ces cylindres doit être naturellement de plus en plus grande, puisque la vapeur augmente



Fig. 73. — Usine pour traction, avec machines horizontales. (Chemin de fer des Invalides à Versailles, unités de 800 kilowatts).

de volume, au fur et à mesure que sa tension diminue. On est ainsi amené, parfois, à dédoubler le troisième cylindre et la machine se présente, alors, comme une machine Compound, avec deux cylindres à droite et à gauche au lieu d'un seul. (Chemin de fer des Invalides à Versailles).

Les machines à triple expansion ont un rendement un peu meilleur que les machines Compound; mais on leur a cependant généralement préféré ces dernières qui sont moins compliquées et consomment moins d'huile.

Les machines à vapeur se montent horizontalement ou verticalement.

La première disposition, qui facilite la surveillance, est certai-

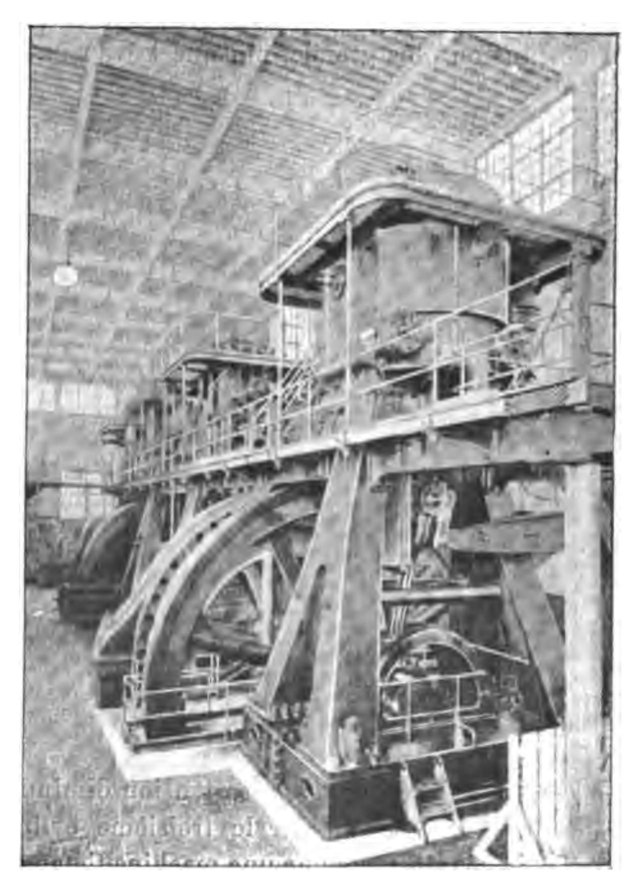


Fig. 74. — Usine pour traction, avec machines verticales.
(Chemin de fer métropolitain de Paris, unités de 1 500 kilowatts).

nement préférable (fig. 73). On n'adopte guère le type vertical que lorsque la place fait défaut, c'est-à dire dans des cas où l'on ne peut faire autrement, ou quand on atteint de très grandes puissances (au-dessus de 1 500 à 2 000 kilowatts). Avec des types

aussi puissants, la machine horizontale deviendrait trop encombrante, par suite du poids considérable des pistons, et les cylindres auraient tendance à s'ovaliser le long de leur génératrice infé-

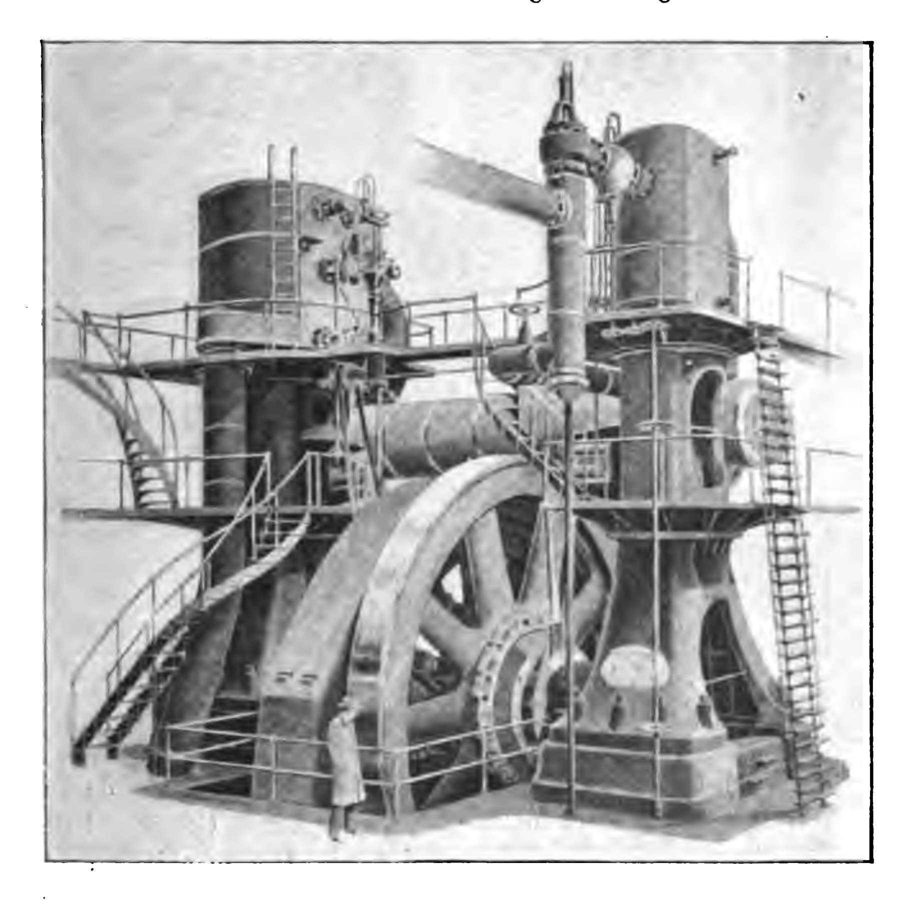


Fig. 75. — Machine Compound verticale, de 5 000 chevaux, de la Cie Westinghouse.

rieure. Mais une machine verticale de 1 500 kilowatts et au delà devient un vrai monument, avec étages et escaliers, au milieu desquels l'œil ne peut fixer que des détails; en sorte que la surveillance générale de la machine devient forcément diffi-

cile. On se rendra compte de la physionomie de telles machines par les figures 74 à 79, qui représentent les machines à vapeur de 1 500 kilowatts du Métropolitain de Paris (établissements

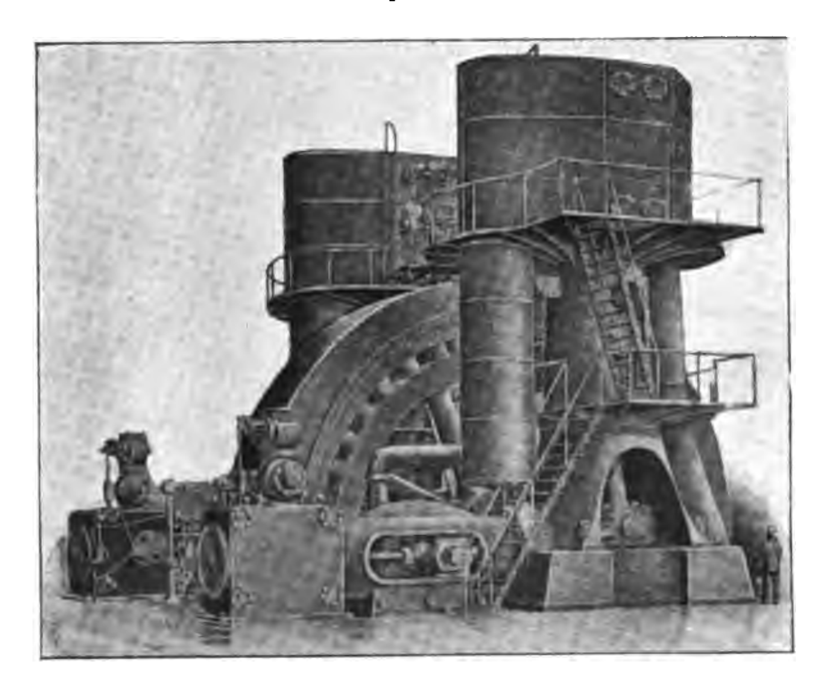


Fig. 76. — Machine Cross-compound de 8 000 chevaux du Manhattan Railway (New-York).

Schneider) une machine Compound de 5 000 chevaux de la Cie Westinghouse et enfin les grandes machines Compound de 8 000 chevaux du Manhattan Railway[1]. Ces machines sont remarquables non seulement par leur puissance, mais encore par le mode de disposition des cylindres. En réalité la machine est double, comprenant, de part et d'autre de l'alternateur, deux machines Cross-Compound, à deux cylindres, l'un horizontal à haute pression, (14 kilogrammes), l'autre vertical à basse

[1] *Génie civil*, 13 septembre 1902.

pression. Les pistons de ces deux cylindres font mouvoir une même manivelle actionnant l'arbre de rotation. De cette façon deux paliers suffisent, ce qui constitue une grande simplification pour le montage, en même temps que l'on réduit au strict

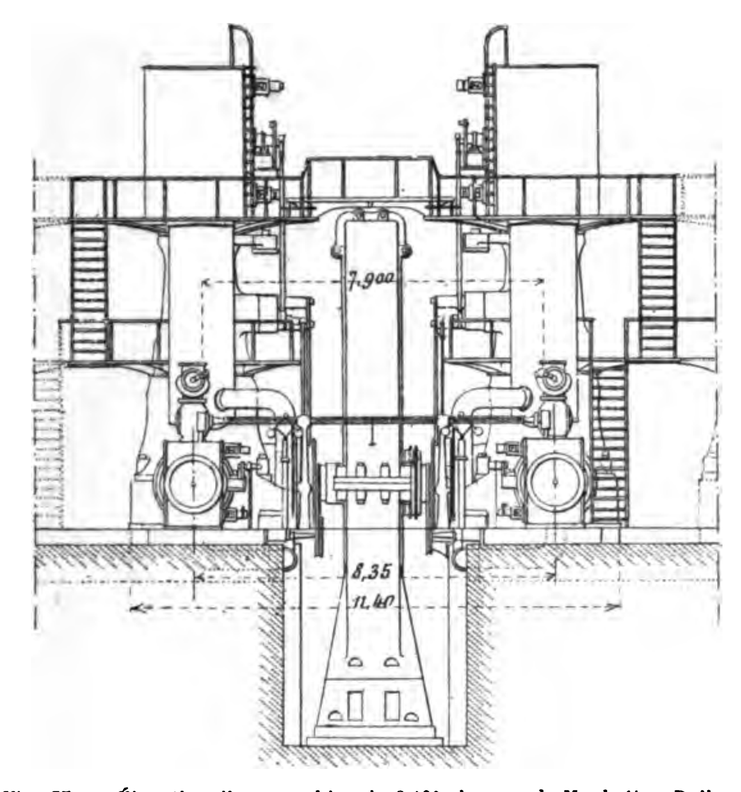


Fig. 77. — Élévation d'une machine de 8 000 chevaux du Manhattan Railway.

minimum la longueur de l'arbre. Le cross-compoundage donne beaucoup de régularité au mouvement et facilite le couplage en parallèle des alternateurs. Ceux-ci sont à inducteur mobile, ce dernier formant volant (son poids est de 168 tonnes). La vitesse de rotation est de 75 tours par minute. L'alternateur fournit des courants triphasés à la tension de 11 000 volts et à 25 périodes.

des alternateurs, les plus puissants qui existent actuellement dans des usines à vapeur, ont 13 mètres de largeur et 12,468 m. de hauteur. Leur poids total est de 400 tonnes (voy. page 55).

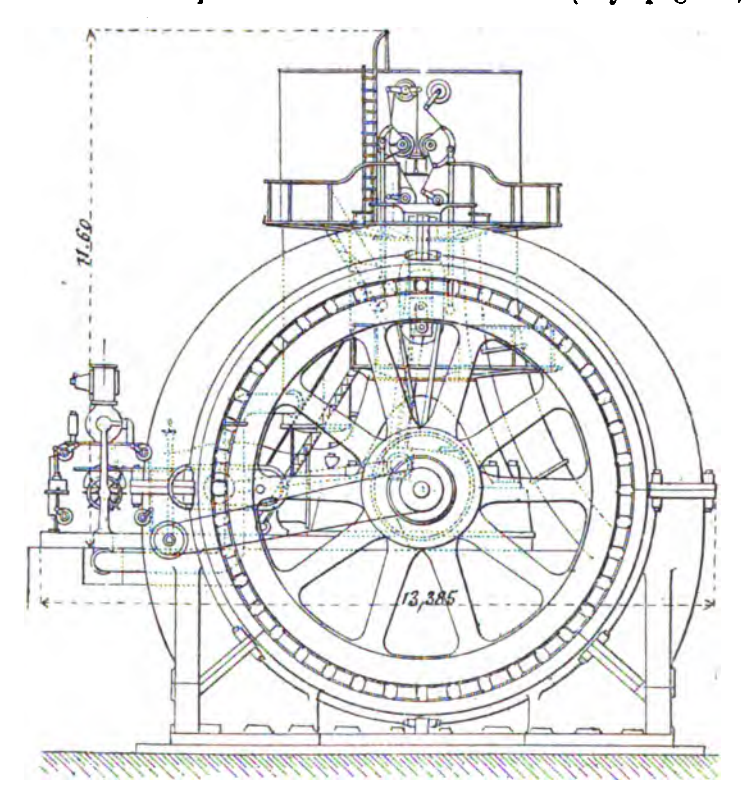


Fig. 78. — Vue latérale d'une machine de 8 000 chevaux du Manhattan Railway.

Emploi de la vapeur surchauffée. — Une des causes de mauvais rendement de la machine à vapeur est l'eau qui se dépose dans les cylindres, soit que la vapeur en entraîne avec elle, soit qu'elle provienne de condensations se produisant dans les cylindres mêmes, par suite de leur mise en communication, au moment de l'échappement de la vapeur, avec des parties froides. L'emploi de réchauffeurs ainsi que d'enveloppes de vapeur et de

revêtements calorifuges autour des tuyaux d'amenée et des

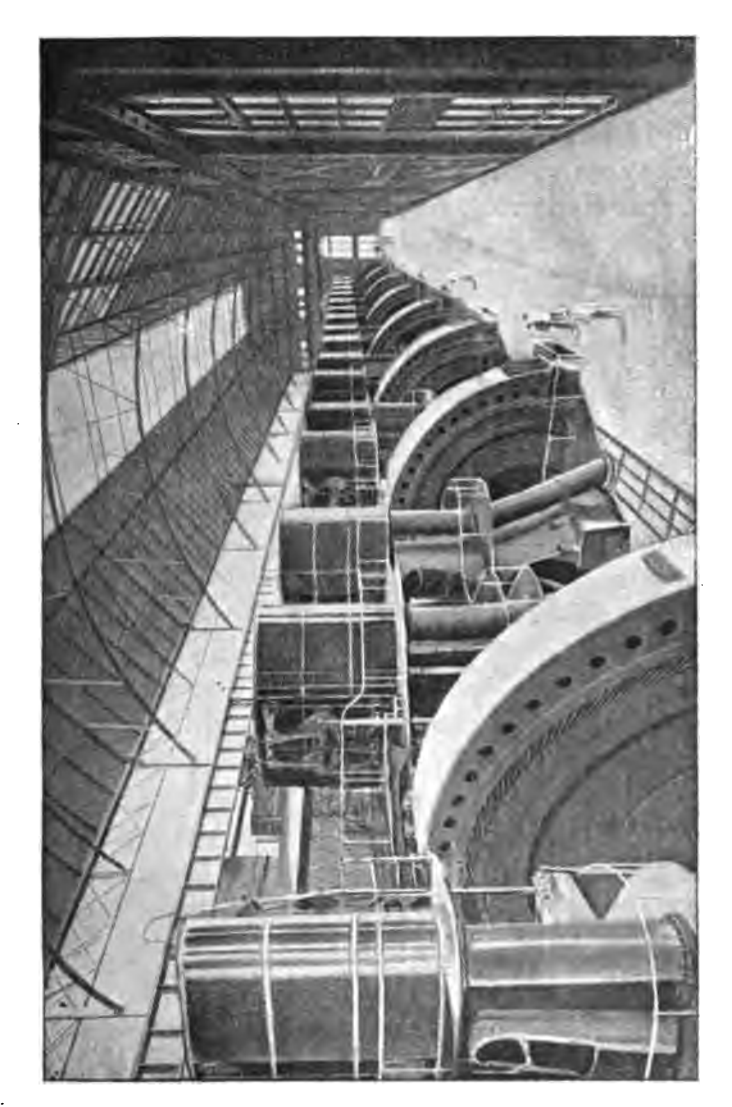


Fig. 79. — Vue générale de l'usine du Manhattan Railway.

cylindres diminue partiellement cet inconvénient; mais il n'en est pas moins un des points faibles de la machine à vapeur

actuelle à condensation et à utilisation de la vapeur, telle qu'elle est engendrée par les chaudières.

On a songé, par suite, à modifier l'état physique de l'eau en surchauffant la vapeur, de manière à obtenir, non une vapeur saturée, mais un gaz à haute température, impropre à subir les les condensations anticipées qui interviennent, d'une façon si fâcheuse, pour diminuer le rendement. A cet effet, on fait passer la vapeur, à sa sortie des chaudières, dans des *surchauffeurs* qui portent sa température à environ 300° et c'est à cette température qu'on l'introduit dans les cylindres.

Mais une machine qui est faite pour de la vapeur à 180°, par exemple, ne peut pas impunément recevoir un gaz à 300°. L'huile s'altère, et les tiroirs, qui ne sont plus convenablement lubrifiés, grippent et se détériorent.

On a donc dû commencer par demander aux fabricants d'huile pour machines des produits pouvant supporter une température de 300°. De telles huiles sont maintenant fabriquées couramment, en sorte que cette difficulté spéciale se trouve aujourd'hui résolue.

En ce qui concerne les tiroirs, on les a remplacés par des soupapes, système de distribution déjà connu, il est vrai, mais que l'on a perfectionné en soignant particulièrement les contacts et en découpant pour ainsi dire la soupape et son siège dans une même masse de métal, bien homogène. A la vérité, il n'est pas impossible de conserver les tiroirs pour une machine à vapeur surchauffée. Mais jusqu'à ce moment les bonnes machines à vapeur surchauffée emploient pour ainsi dire exclusivement la distribution par soupapes.

Les machines à vapeur surchauffée constituent une classe nouvelle et très intéressante de moteurs à vapeur. Elles permettent d'obtenir le cheval-heure indiqué pour 550 grammes de charbon, au lieu de 700 à 750 que nécessitent les machines ordinaires, à vapeur saturée. L'économie est donc sérieuse et devra certai-

nement être prise en considération par tous les ingénieurs qui auront à construire des usines nouvelles.

Appareils accessoires. — Nous n'avons pas l'intention de passer en revue les nombreux appareils accessoires que l'on rencontre dans une grande usine pour traction. Insistons seulement sur les principaux.

L'alimentation des chaudières nécessite l'installation de pompes aspirantes et foulantes que mettent en mouvement des moteurs à vapeur ou électriques. Cette dernière disposition, qui était assez usitée, tend à être abandonnée, les moteurs électriques n'offrant pas, dans le cas actuel, des avantages spéciaux et ayant, au contraire, l'inconvénient de nécessiter une réduction de vitesse. Toutefois les moteurs électriques seraient parfaitement à leur place si l'on devait aller puiser l'eau à quelque distance de l'usine pour l'amener dans des réservoirs où elle serait ensuite reprise par les alimentateurs. On ferait alors usage de pompes centrifuges qui se prêtent parfaitement à l'accouplement direct.

Toutes les grandes machines marchant à condensation, il faut, pour condenser la vapeur, des appareils spéciaux, dits *condenseurs* et que l'on distingue en *condenseurs à mélange* et en *condenseurs à surface*. Les premiers sont les plus employés. Ils comportent une injection d'eau pour refroidir la vapeur et une aspiration pour faire le vide dans l'appareil. En Amérique, les machines qui actionnent les condenseurs sont généralement distinctes des machines motrices; en Europe on met au contraire les pompes à air en mouvement le plus souvent par une bielle actionnée par la machine motrice. Parfois même (machines horizontales) c'est le piston de la machine dont la tige se prolonge de manière à faire mouvoir le piston de la pompe à air. Une nouveauté intéressante consiste dans les *condenseurs atmosphériques* qui assurent la constance du vide, malgré les variations de la charge des machines.

Dans les grandes usines, le graissage est une source importante de dépenses. Il est intéressant, d'autre part, d'éviter le transport à la main, entre le magasin et la salle des machines, des quantités considérables d'huile que consomme le service normal des machines. Aussi a-t-on organisé parfois et avec beaucoup d'à-propos de véritables distributions d'huile, desservant tous les organes à lubrifier et ramenant l'huile à un filtre qui la débarrasse de ses impuretés. De là l'huile est élevée dans un réservoir supérieur et revient sous pression dans les différentes canalisations de distribution.

A côté des installations usuelles d'ordre mécanique ou électrique, les grandes usines pour traction doivent présenter un certain nombre d'aménagements concernant la sécurité et le bien-être du personnel. Rentrent notamment dans cette catégorie les lavabos, salles de douches, salles de bains, réfectoires avec fourneaux mis à la disposition des ouvriers, etc., toutes installations peu coûteuses et cependant fort appréciées du personnel. Les Américains attachent une grande importance à ces accessoires, qui font toujours chez eux l'objet d'une construction soignée. De cette façon l'ouvrier s'attache plus volontiers à l'usine et si l'on sait, en outre, l'intéresser à la bonne marche de la production par des primes judicieusement établies, on peut arriver à réaliser une exploitation tout à fait économique. On verra que, dans une usine bien combinée, le prix de revient peut souvent descendre au-dessous de 0 fr. 06 le kilowatt-heure. Un chiffre aussi bas montre, par lui-même, l'étendue des améliorations qui ont pu être apportées, dans ces dernières années, aux conditions premières de la production électrique.

Turbines à vapeur. — En parlant des usines hydro-électriques, nous avons montré les avantages spéciaux des turbines à eau, au point de vue de la génération de l'électricité. On a cherché, par analogie, à créer des turbines à vapeur, faisant remarquer que

le mouvement alternatif des machines à vapeur usuelles n'est pas du tout celui qui convient, à priori, pour des dynamos, dont le mouvement est circulaire.

Les turbines à vapeur, que l'on a combinées dans ce but, constituent une nouvelle classe de machines très intéressantes. Indépendamment de l'avantage que présente leur mouvement circulaire, on peut insister : d'abord sur la vitesse de rotation qui est tout à fait constante pour un tour de l'arbre moteur; ensuite sur leur vitesse élevée, qui permet non seulement leur accouplement direct avec des dynamos, mais l'emploi de dynamos tournant très vite, c'est-à-dire pouvant fournir une grande puissance électrique, sous un petit volume[1]. D'autre part, l'entretien de ces moteurs se trouve bien simplifié, attendu que l'arbre de rotation, tout en pouvant fournir des centaines de chevaux, n'exerce sur ses paliers qu'une pression correspondant à son poids, la force de la vapeur agissant tangentiellement à la turbine. Enfin on peut employer, avec ces machines, de la vapeur à haute pression et à haute température, ce qui améliore le rendement final. Si l'on ajoute encore qu'elles ne nécessitent qu'un emplacement minime, on arrive à supposer qu'elles devront se faire, dans l'industrie électrique, une place grandissante et l'on s'explique pourquoi déjà, dans un certain nombre d'installations très importantes, on les a préférées aux machines à vapeur.

Les turbines à vapeur peuvent se diviser en deux classes : les *turbines à simple roue* et les *turbines à roues multiples*.

Le premier système, auquel appartient la turbine de Laval, est tout à fait comparable aux roues-turbines, dont nous avons montré le fonctionnement, en parlant des usines hydrauliques.

[1] Mais des dynamos à grande vitesse (2 à 3 000 tours par minute) exigent une grande perfection de fabrication. MM. Brown-Boveri ont très heureusement résolu les difficultés inhérentes à des vitesses de rotation aussi considérables. Ils ont créé un type spécial de dynamo et d'alternateur, avec accouplement direct, supportant parfaitement des vitesses tangentielles de 60 mètres à la seconde et ne comportant que des dépenses d'entretien excessivement faibles.

Sur la périphérie d'une roue en acier sont montées un grand nombre d'ailettes que vient frapper la vapeur, sortant de tuyères réparties le long de la roue. Le tout est, bien entendu, renfermé dans une boîte étanche, communiquant toutefois avec un condenseur[1].

La vitesse de rotation ainsi obtenue est considérable, attendu que la vitesse de la vapeur, à la sortie des tuyères, atteint faci-

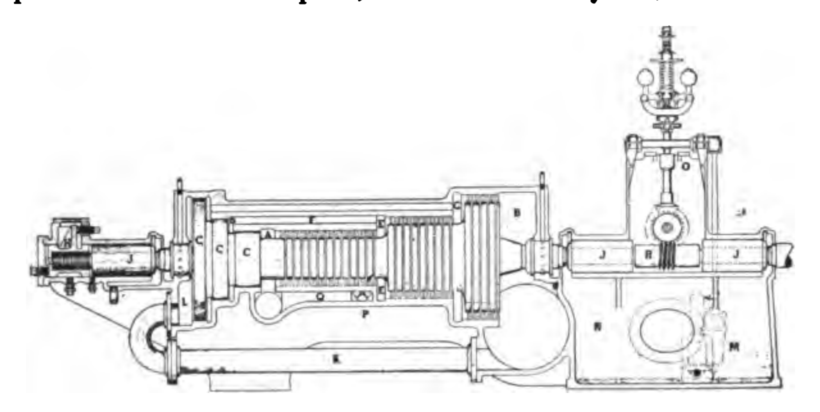


Fig. 80. — Disposition générale d'une turbine Parsons.

lement 1 000 mètres par seconde. Mais, par suite des remous et des jeux qui existent dans l'appareil, la vitesse tangentielle de la roue est loin d'être aussi élevée. On ne pourrait d'ailleurs pas, même en employant les aciers les plus résistants, se risquer à réaliser une vitesse pareille, car, sous l'action de la force centrifuge, la roue se disloquerait. La pratique a montré que l'on pouvait

[1] Avec les turbines la condensation peut être poussée jusqu'à ses dernières limites, au grand avantage du rendement. M. Rateau, dont nous décrirons plus loin la turbine à roues multiples, fait remarquer qu'avec des machines à pistons, même en employant la triple expansion, on ne retire pas de la condensation tout ce qu'elle peut donner (40 p. 100 d'économie par rapport à l'échappement à air libre) faute de ne pouvoir donner au troisième cylindre des dimensions suffisantes, ainsi du reste qu'aux orifices d'évacuation. D'autre part, en poussant la condensation trop loin on produit dans l'intérieur des pistons des abaissements de température qui occasionnent des condensations. Avec les turbines, dans lesquelles le courant de vapeur a lieu toujours dans le même sens, cet inconvénient n'existe pas et l'on peut pousser la détente jusqu'à la pression même du condenseur.

tout au plus atteindre de 350 à 400 mètres. C'est déjà beaucoup puisque, alors, la machine tourne à la vitesse de 20 000 à 30 000 tours par minute. Cependant à ne s'en fier qu'au calcul, ce ne serait pas encore assez, attendu que le maximum de rendement correspondrait à une vitesse moitié de la vitesse d'échappement de la vapeur, soit 500 mètres par seconde. La conséquence est que le

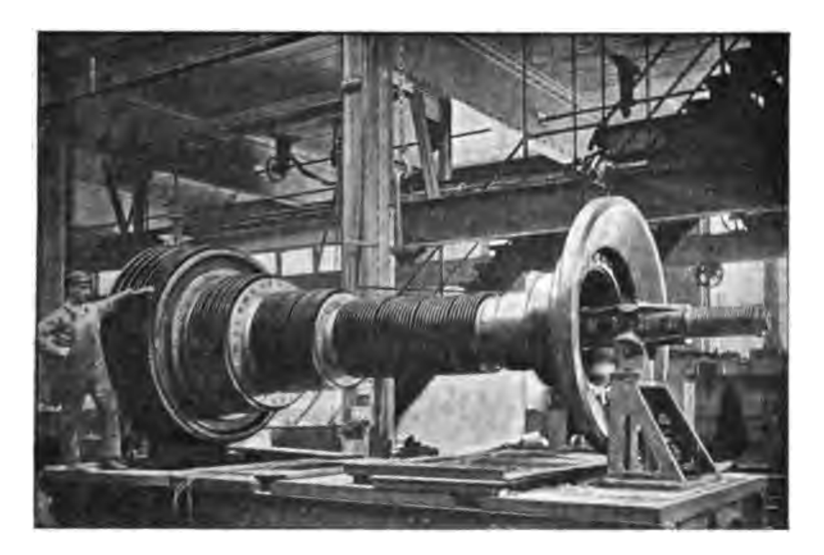


Fig. 81. — Turbine Parsons. Roue motrice.

rendement de telles turbines est assez faible, sans compter que, pour actionner des dynamos, une transmission par engrenages doit intervenir. Or, non seulement une transmission de cette nature absorbe inutilement du travail, mais il faut bien remarquer encore que des engrenages, pouvant tourner à raison de 20 à 30 000 tours par minute, ne sont pas d'un type courant et qu'ils doivent être faits avec des soins spéciaux.

Dans la *turbine Parsons* la cause de mauvais rendement des turbines à roue unique se trouve très ingénieusement éliminée de la façon suivante (fig. 80).

La vapeur est distribuée par toute une série d'aubages placés en regard d'aubages correspondants, régnant à la périphérie de la roue motrice (fig. 81). C'est donc une disposition analogue à celle d'une turbine parallèle. La vapeur, en traversant ces aubages, pousse la roue et la fait tourner. Mais, après avoir effectué ce travail, elle a encore une pression élevée et on la reçoit dans une nouvelle série d'aubages distributeurs, agissant sur une deuxième roue motrice montée sur le même arbre que la première. Ensuite la vapeur actionne encore une troisième roue, puis une quatrième, etc. Enfin arrive un moment où, s'étant détendue, son volume a fortement augmenté. Elle passe alors dans des roues de diamètre plus grand, se détendant de plus en plus. Une troisième série de roues, à diamètre encore plus fort, est enfin traversé et de là, la vapeur se rend au condenseur.

L'équilibrage de l'arbre moteur est obtenu d'une façon très ingénieuse en munissant cet arbre de trois couronnes dont les diamètres respectifs sont ceux des trois séries de roues motrices. En A, point où arrive la vapeur (fig. 80), la pression s'exerce à droite et à gauche, et il y a équilibre. En E, un canal F amène une dérivation de la vapeur sur la deuxième couronne, équilibrantainsi la pression qui s'exerce de part et d'autre de A. Enfin la troisième série de roues communique par un tuyau partant de G avec la face intérieure de la troisième couronne. Quant à la face extérieure elle est, comme la dernière roue motrice, en communication avec le condenseur.

On voit que, de cette façon, l'arbre moteur se trouve parfaitement équilibré. Les paliers sont, d'autre part, extérieurs à la turbine et peuvent être facilement surveillés. Enfin, dans le prolongement de la turbine, se trouve l'appareil régulateur. C'est un régulateur à boules et à force centrifuge, qui ouvre plus ou moins l'orifice d'adduction de la vapeur.

On peut, lorsque la turbine commande une dynamo, régler la vitesse par le voltage même de cette dynamo. A cet effet, on

actionne, par une dérivation, un solénoïde qui agit sur la vanne d'admission pour l'ouvrir ou la fermer partiellement, quand le voltage décroît ou croît.

L'emploi de la pression de la vapeur, par échelons [1], au lieu de son utilisation en une seule fois, comme dans les turbines genre de Laval a, comme corollaires immédiats, d'après ce que nous

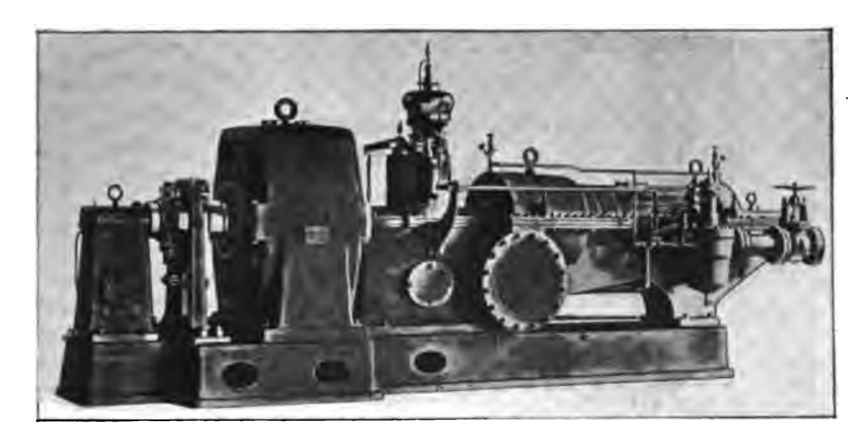


Fig. 82. — Turbine Parsons, actionnant directement une dynamo.

avons dit plus haut, une diminution de la vitesse de rotation et une amélioration du rendement

Les grosses unités Parsons (on en construit qui développent jusqu'à 5 à 6000 kilowatts, en particulier le Métropolitain de Londres doit comporter des unités de 5000 kilowatts) ne tournent qu'à 750 tours permettant, par conséquent, même avec des alternateurs, de réaliser l'accouplement direct, tout en tenant le nombre des périodes dans des valeurs relativement basses (de 20 à 25) (fig. 82 et 83). La vapeur est employée à toutes pressions, avec ou sans surchauffe; mais on a avantage, comme pour les machines à vapeur, à prendre de la vapeur à haute pression (de 12 à 14 kilogrammes) et à porter sa température jusqu'à 300 degrés et même

[1] On peut, d'ailleurs, augmenter le nombre des échelons.

plus. L'élévation de la température est, avec ces turbines, d'autant plus acceptable, que les paliers, c'est-à-dire les seuls organes qui ont besoin d'être graissés, ne sont pas en contact avec la vapeur. Quant à la consommation de vapeur, elle s'abaisse facilement à 5,5 kg. par cheval indiqué.

MM. Brown-Boveri, qui construisent, dans leurs ateliers de

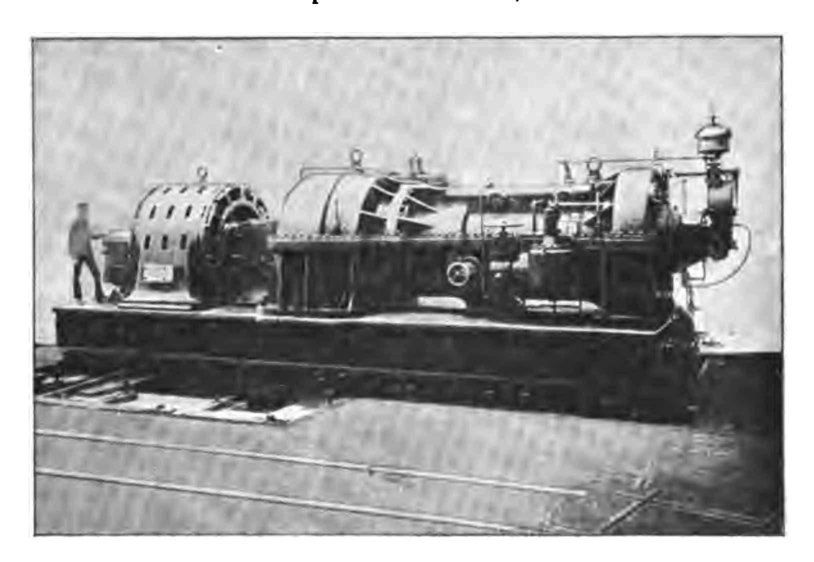


Fig. 83. — Groupe électrogène Parsons de 1 500 kilowatts.

Baden, la turbine Parsons, garantissent, pour des grosses unités (3 000 KW) des consommations de vapeur (à 10 kg. et 250°) de 6,8 kg. par KWH et pour les petites unités (300 KW) 9,7 kg. Rapportée au cheval indiqué, la consommation de vapeur ressort ainsi, pour les grosses unités, à moins de 4,5 kg. D'autre part, la consommation de l'huile ne dépasse pas 0,25 grammes par KWH pour les grosses unités et 0,50 grammes, pour les petites.

La *turbine Rateau* est, comme la turbine Parsons, une turbine à roues multiples; mais chaque roue tourne entre deux diaphragmes qui l'isolent des roues voisines (fig. 84). Ces diaphragmes sont

fixés à la périphérie intérieure de l'enveloppe et sont munis, près

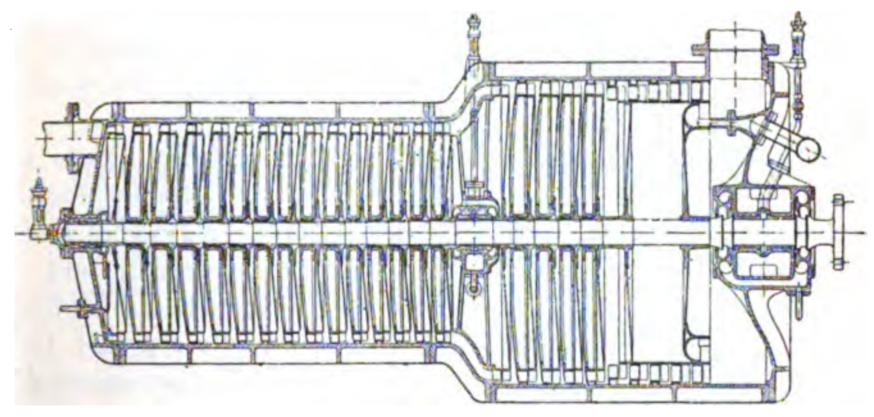


Fig. 84. — Disposition intérieure d'une turbine Rateau.

de leur zone d'attache, d'aubages (fig. 85) par lesquels la vapeur, après avoir agi sur une roue, pénètre dans le deuxième compartiment et fait tourner la deuxième roue (fig. 86 et 87). L'arbre de la turbine traverse tous les diaphragmes avec un jeu très petit, le seul par lequel puisse s'échapper inutilement la vapeur. Dans ces conditions on peut dire que, pratiquement, toute la vapeur concourt à la rotation de l'appareil. Peut-être pourrait-on craindre au contraire que, par suite du faible jeu existant entre les diaphragmes et l'arbre, il ne se produise des frottements susceptibles d'absorber du travail; mais les diaphragmes, dans l'évasement qu'ils présentent

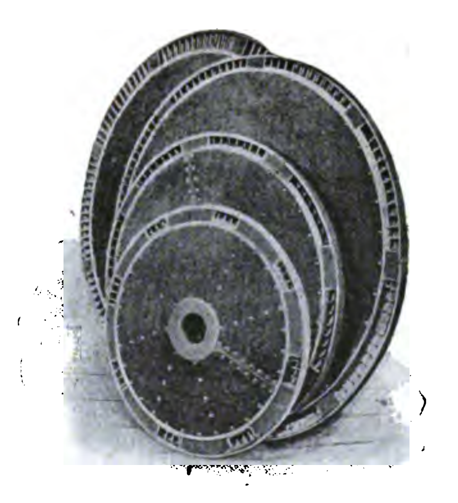


Fig. 85. — Diaphragmes de la turbine Rateau.

pour laisser passer l'arbre, sont munis de métal anti-friction et ce métal s'écraserait, sans gêner la rotation, si le jeu venait à être insuffisant.



Fig. 86. — Roues motrices de la turbine Rateau.

La turbine Rateau se trouve d'elle-même équilibrée et n'a pas besoin de pistons compensateurs.

Comme la turbine Parsons, elle convient très bien à l'actionnement direct des dynamos (fig. 88) et a le grand avantage de n'occuper également qu'une place très minime (le 1/3 environ d'une machine à vapeur de même puissance).

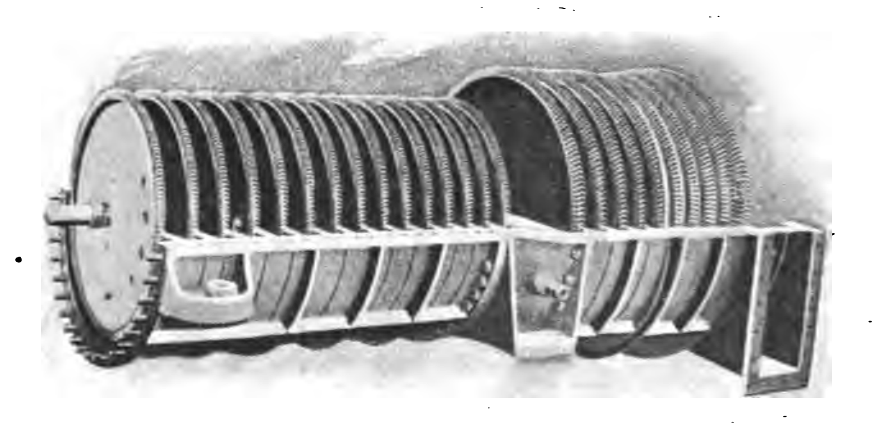


Fig. 87. — Ensemble des roues motrices dans la turbine Rateau.

La consommation de vapeur, pour de grosses unités, est donnée

comme étant un peu inférieure à celle qui a été indiquée plus haut pour la turbine Parsons.

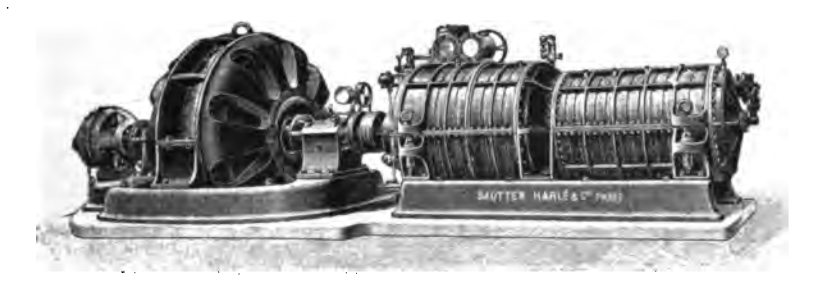


Fig. 88. — Turbine Rateau actionnant directement une dynamo.

Usines avec moteurs à gaz. — Nous n'ajouterons que très peu de mots à ceux que nous avons déjà dits sur ce sujet. Quelques usines pour tramways (Orléans, Cassel, Lausanne, etc.) ont adopté ce système et paraissent s'en bien trouver. Mais il s'agit d'installations modestes et, à l'heure actuelle, il n'existe pas, en somme, de grandes usines pour traction, avec moteurs à gaz.

La nécessité d'employer des charbons spéciaux, un coût d'établissement élevé et l'absence de précédents ont naturellement empêché ce système, malgré son intérêt, de se propager. Toutes les grandes usines de ces dernières années (New-York, Boston, Chicago, Paris, Berlin, etc.) ont, comme élément, la machine à vapeur.

Mais dans des cas particuliers, par exemple s'il s'agit d'une ligne circulant dans des régions houillères, il y aura lieu d'envisager l'emploi possible des moteurs à gaz pour la production de l'électricité. Il pourra arriver que de grandes industries (fours à coke, hauts fourneaux) puissent livrer à bon compte d'énormes quantités de gaz aptes à l'alimentation des moteurs et l'on aura alors la possibilité de produire l'électricité à un prix infime.

Cependant l'on n'aime guère, quand on a à assurer un service public, dépendre de tiers ou d'industries qui ne peuvent pas, for-

cément, présenter le caractère de stabilité ou de régularité de l'entreprise dont on a la charge. En sorte que le cas ci-dessus envisagé est plutôt théorique. Mais il devait être indiqué, car il correspond à une physionomie nouvelle de la production électrique. Et d'ailleurs telle combinaison pourra intervenir, donnant à l'exploitant, à la fois la sécurité et le bon marché.

Emploi des acumulateurs dans les stations centrales. — Les stations centrales pour traction sont soumises à des à-coups très

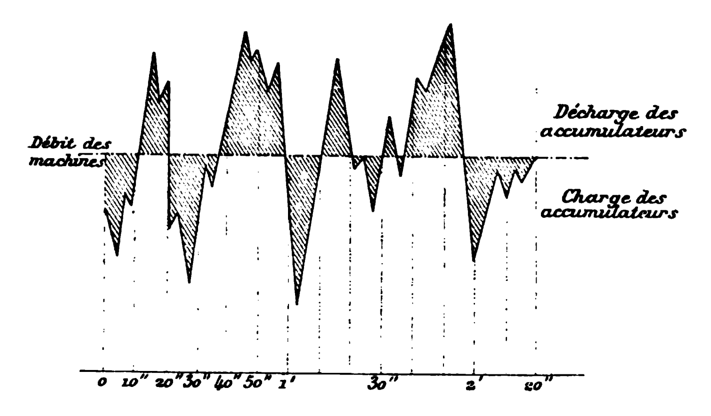


Fig. 89. — Mode d'action d'une batterie-tampon sur le débit d'une usine.

intenses. On verra, en effet, plus loin que le démarrage des trains ou leur circulation sur des rampes accentuées peuvent occasionner des appels momentanés de courant, atteignant facilement 2 000 ampères. A la vérité, les énormes volants que l'on ajoute aux machines corrigent, en partie, ces variations subites de l'intensité et, d'autre part, ces dernières peuvent s'atténuer, si l'usine alimente à la fois un très grand nombre de trains. Mais la puissance demandée aux machines n'en subit pas moins des oscillations peu compatibles avec un bon rendement. Aussi a-t-on pensé à adjoindre aux machines des batteries d'accumulateurs, ayant comme destination d'emmagasiner l'énergie en excès, au moment où la consomma-

tion baisse sur le réseau et de restituer de l'électricité, quand il se fait un appel de courant supérieur à la production normale des machines. Ces batteries agissent ainsi comme un volant. Elles forment tampon d'où le nom de *batteries-tampon*, sous lequel on les désigne généralement (fig. 89).

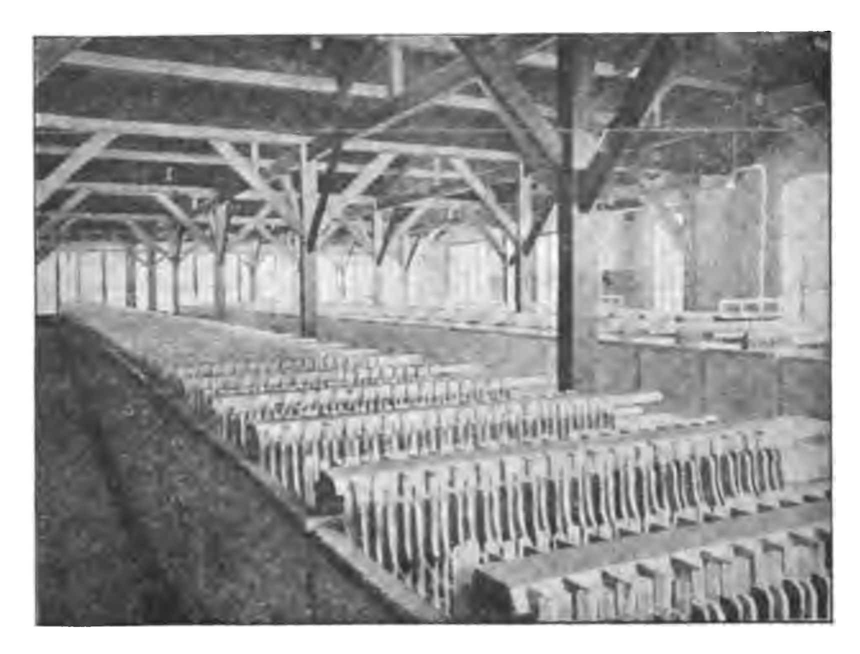


Fig. 90. — Vue d'une batterie-tampon.

Mais il faut bien remarquer que ces batteries ne sont admissibles que dans des usines à courant continu, puisque les courants alternatifs ne se prêtent pas à la charge des accumulateurs. Toutefois, si les courants alternatifs doivent être transformés en courant continu dans des sous-stations, on aura la possibilité d'utiliser le pouvoir régulateur des batteries, en plaçant celles-ci dans les sous-stations.

Les accumulateurs actuellement en usage sont toujours des accumulateurs au plomb. Une batterie se compose d'un certain

nombre d'éléments comportant des *plaques positives* et des *plaques négatives*, plongeant partiellement dans de l'eau distillée à laquelle on a ajouté de l'acide sulfurique. Cet électrolyte est renfermé dans des bacs en bois doublé de plomb et reposant sur des madriers ou des tasseaux isolés (fig. 90). Les éléments sont réunis en série, comme des piles, et l'on en calcule le nombre en admettant que la tension la plus convenable à donner à chaque élément, pour qu'il fonctionne bien comme volant, est de 2 volts 05. Par conséquent, si la tension des machines est de 600 volts, le nombre des éléments sera de $\frac{600}{2,05} = 294$. La batterie ainsi constituée est placée *en dérivation* sur le réseau. Pour voir comment elle va intervenir, il suffit de tracer sa caractéristique. c'est-à-dire la courbe des ampères en fonction des volts. Cette courbe, que l'on relève expérimentalement, est représentée par la figure 91, les ordonnées se rapportant aux volts et les abscisses aux ampères. A droite de O la courbe donnera le régime de charge et à gauche le régime de décharge. Supposons qu'à un certain moment l'intensité sur le réseau diminue de OA et que, par suite, une telle intensité devienne disponible au tableau de l'usine. On voit que pour qu'elle puisse être absorbée par la batterie, la tension à ce moment devra être égale à AB, c'est-à-dire dépasser de BC la tension de la machine ramenée à un élément. Si donc la tension de la machine, supposée constante, n'était pas surélevée, il serait impossible d'emmagasiner dans la batterie l'intensité OA disponible. Alors intervient un organe spécial, le *survolteur* qui a justement pour but de donner à OA le supplément de tension BC, qui

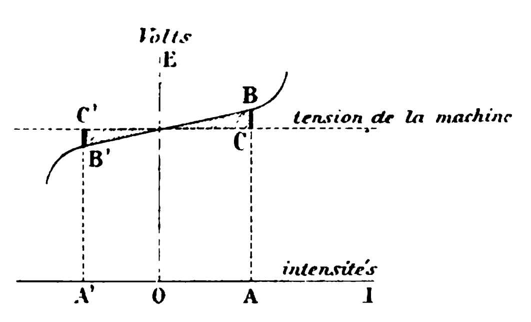


Fig. 91. — Caractéristique d'un élément de batterie tampon.

lui est nécessaire. Supposons, au contraire, que la consommation du réseau dépasse de OA′ le débit normal des machines. La batterie sera alors susceptible de donner OA′, mais à la tension A′B′ seulement. Le complément de tension B′C′ sera encore donné par le survolteur.

Ce raisonnement suppose que la tension de la machine est constante ; mais cette tension, malgré le compoundage ou l'hypercompoundage des enroulements, subit toujours des variations plus ou moins prononcées, selon le type de machine, la tension augmentant quand le débit sur le réseau diminue et fléchissant, d'autre part, si la demande de courant augmente. Par conséquent, il se produit, de part et d'autre de la zone d'équilibre, des variations de voltage qui permettent jusqu'à un certain point à la batterie de se charger et de se décharger ; en sorte que, même sans survolteur, une batterie en dérivation sur les bornes de l'usine peut, dans certaines limites, faire l'office de batterie-tampon. Mais sa capacité est ainsi moins bien utilisée. Aussi n'emploie-t-on les batteries sans survolteurs que dans des installations peu importantes et où le réglage de la tension n'a pas besoin d'être serré de près.

A la vérité il est possible, avec des génératrices à caractéristiques spéciales, d'augmenter l'étendue des charges et des décharges de la batterie. Et même certains artifices ont été employés (par exemple dans l'usine des tramways de Bordeaux), pour modifier, dans le sens ci-dessus, des dynamos à caractéristique ordinaire. Mais il est encore plus commode de recourir à un survolteur, d'autant plus qu'un tel organe est également très utile pour la charge à fond de la batterie [1].

Le survolteur n'est autre qu'une dynamo, avec excitation en série, que met en mouvement un moteur shunt (par suite à

[1] Il existe d'autres modes de montage de batteries, mais moins simples. Voir à ce sujet, les articles de M. Jumau dans l'*Éclairage électrique*. Nos du 29 novembre 1902 et suivants.

vitesse sensiblement constante) et qui est traversée par le courant total de la batterie. Comme conséquence du mode d'excitation, le survoltage est proportionnel à l'intensité, ce qui doit être justement réalisé pour obtenir les charges et décharges dans les conditions ci-dessus indiquées. Un tel survolteur est, par suite, autorégulateur de la tension, effectuant la charge et la décharge selon les disponibilités ou la demande du réseau et sans interposition d'aucun autre appareil.

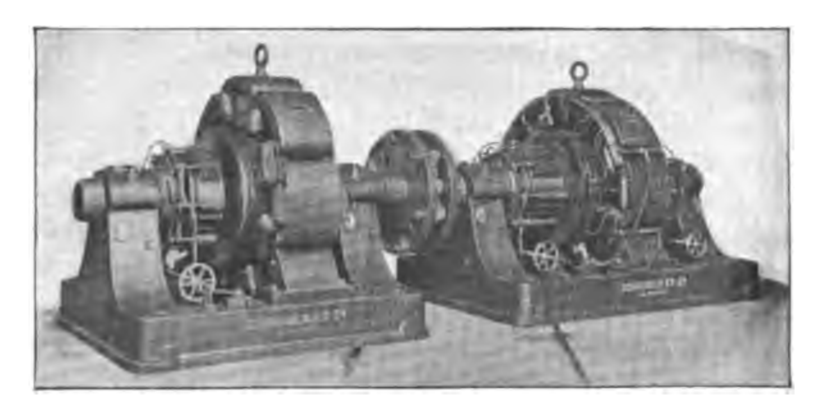


Fig. 92. — Survolteur pour batterie-tampon.

La figure 92 montre un survolteur, type du Creusot, employé à Paris, à l'usine du Métropolitain. Le moteur shunt est à 550 volts. Le survolteur proprement dit, c'est-à-dire la dynamo à excitation série peut donner ± 25 volts.

Comme l'expérience démontre que l'on diminue beaucoup les frais d'entretien d'une batterie-tampon, en la chargeant à fond de temps en temps et qu'on ne pourrait le faire avec seulement 25 volts de supplément, on a installé sur les inducteurs du survolteur un second enroulement, qui est en dérivation sur le circuit de la batterie et que l'on fait intervenir quand on veut pousser la charge de la batterie elle-même (fig. 93). Un rhéostat permet de faire varier l'intensité du courant traversant l'enroulement.

Grâce à cet artifice on peut porter progressivement la tension jusqu'à 150 volts, ce qui suffit pour la charge complète de la batterie.

Cette batterie, du système Tudor, a une capacité de 1 600 ampères avec une durée de décharge de 1 heure ; elle peut supporter, d'autre part, des à-coups de 3 000 ampères. Le nombre des éléments est de 270 (pour 550 volts). Avec une telle batterie les variations de voltage de la machine sont inférieures à 5 p. 100.

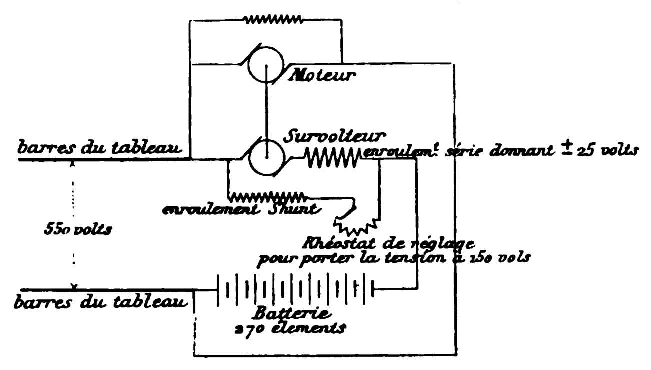


Fig. 93. — Mode d'emploi d'un survolteur.

Si les batteries-tampon ont des avantages au point de vue de la régularisation de la tension et du travail des machines, elles les font, en revanche, payer par une consommation supplémentaire d'énergie et par un entretien assez dispendieux. Il est toutefois à remarquer que des batteries-tampon ont cependant un meilleur rendement que des batteries affectées à des réseaux d'éclairage. Il peut atteindre de 80 à 85 p. 100, alors que, dans une usine pour lumière, on ne dépasse guère 70 p. 100. Quant à l'entretien il coûte de 5 à 7 p. 100 de la dépense de premier établissement.

Ces diverses sujétions ont souvent fait reculer les exploitants devant l'emploi de batteries. Elles sont néanmoins avantageuses dans bien des cas. C'est seulement sur des réseaux à grand débit et trains nombreux qu'elles deviennent sans intérêt et encore y aura-t-il lieu d'envisager la question de l'éclairage ainsi que celle des services accessoires, pendant l'arrêt des machines.

CHAPITRE III

VOIE

Voie proprement dite. Éclissages électriques. Éclissages plastiques et à amalgame. Rails soudés. Dispositions complémentaires pour assurer le retour du courant par les rails. Profil en long; pentes et rampes. Courbes.

Voie proprement dite. — La voie d'un chemin de fer électrique doit avoir toutes les qualités d'une bonne voie de chemin de fer à vapeur. A la vérité la fatigue sera moindre, en raison du mouvement rotatif des moteurs qui permet, beaucoup mieux que le mouvement alternatif des locomotives, l'insertion des roues entre les rails. Mais il n'y aura pas lieu d'en tenir compte pour sacrifier à la solidité, l'expérience prouvant qu'une voie résistante. robuste et bien établie, revient finalement moins cher, quand on fait masse des dépenses d'entretien et d'établissement, qu'une voie plus économiquement construite.

Des rails lourds et longs sont à recommander : lourds parce que la voie sera moins déformable, longs pour la double raison que le passage du matériel sur les joints sera moins fréquent et que, d'autre part, les éclissages électriques seront moins nombreux. Nous entendons par *éclissages électriques*, comme nous l'avons dit au chapitre premier, les jonctions en cuivre que l'on établit de part et d'autre des joints, afin de transformer la voie en un conducteur ininterrompu. Toutefois de tels éclissages ne sont nécessaires qu'autant que l'on se sert des rails pour le retour du courant. Mais c'est là le cas le plus général. A ce point de vue l'emploi de rails pesants est également un avantage, car la résis-

tance électrique d'un rail diminue quand son poids augmente.

Des rails de 18 mètres de longueur et de 45 à 50 kilogrammes au mètre courant conviennent très bien pour un chemin de fer électrique[1].

On peut faire usage soit du rail à double champignon, soit du rail Vignole; mais ce dernier paraît préférable, car il facilite la pose des éclissages électriques (fig. 94, 95, 96).

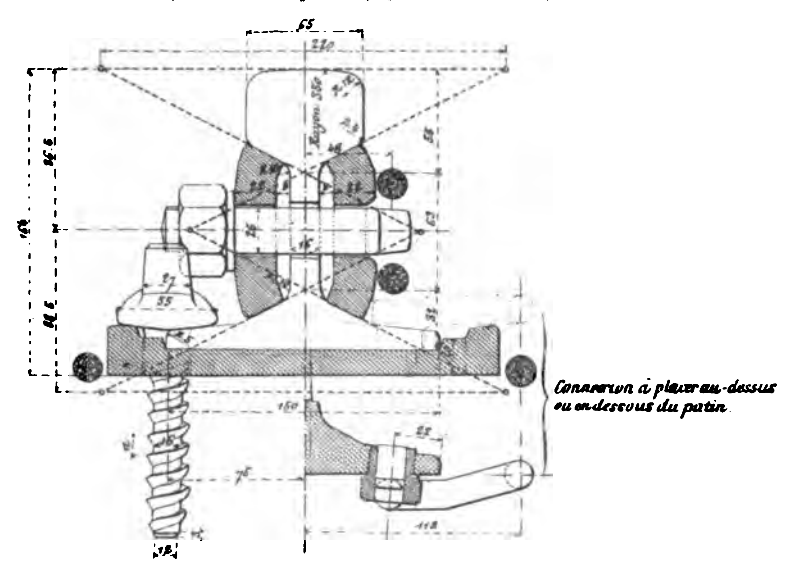


Fig. 94. — Rail Vignole du chemin de fer métropolitain de Paris.

Le montage de la voie n'offre rien de bien particulier. Signalons cependant que, dans certaines installations (le Métropolitain de Berlin, par exemple), on n'a pas jugé utile, en raison de la suppression des mouvements de lacets qui sont la caractéristique de la locomotive à vapeur, d'incliner les rails sur les traverses. Ceux-ci sont placés verticalement et la table de roulement est horizontale. Le bandage de la roue est établi en conséquence.

[1] Sur la ligne Aurora Elgin and Chicago, on a même employé des rails de 20 mètres de longueur.

Que le rail soit vertical ou incliné, il y a d'ailleurs toujours un très grand intérêt à mettre son profil en harmonie avec celui du bandage des roues. Nous reviendrons sur ce point en parlant du matériel roulant.

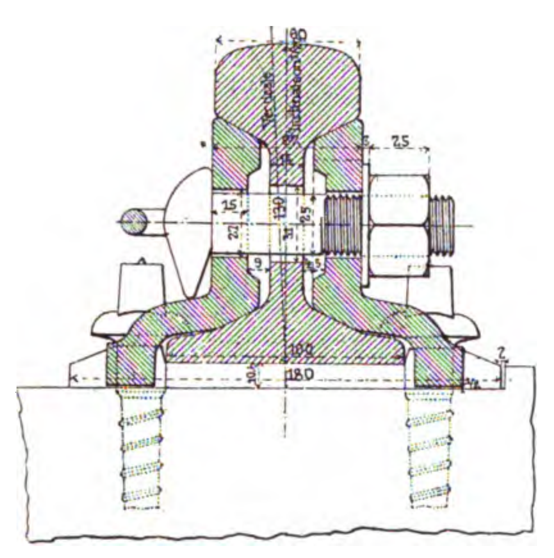


Fig. 95. — Rail Vignole du chemin de fer électrique de Milan à Varèse.

La pose des rails sur traverses et ballast est celle qui convient le mieux, à air libre. Quand la distribution du courant se fait par troisième rail on prévoit, tous les 3 à 4 mètres, une traverse un peu plus longue que les autres pour soutenir le rail conducteur (fig. 97 et 98). Dans les souterrains, surtout les grands souterrains, comme ceux des métropolitains, la pose sur longrines peut également être envisagée (fig. 99). On obtient, avec ce système, une voie bien fixe, facile à visiter et dont l'entretien, si le tunnel est sec, est à peu près nul. L'inconvénient est qu'elle est un peu sonore. Mais on diminuera l'importance des vibrations en plaçant sous les rails des semelles en feutre ou en bois de peuplier. Au surplus, la sonorité de la voie sur longrine se trouve fortement atténuée quand la traction est assurée, non par des locomotives électriques, mais par des automotrices électriques.

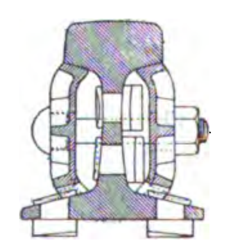


Fig. 96. — Rail Vignole du chemin de fer électrique du Fayet à Chamonix.

Dans les courbes, la pose de la voie sur longrines présente cer-

taines difficultés en raison du dévers et de l'installation du troi-

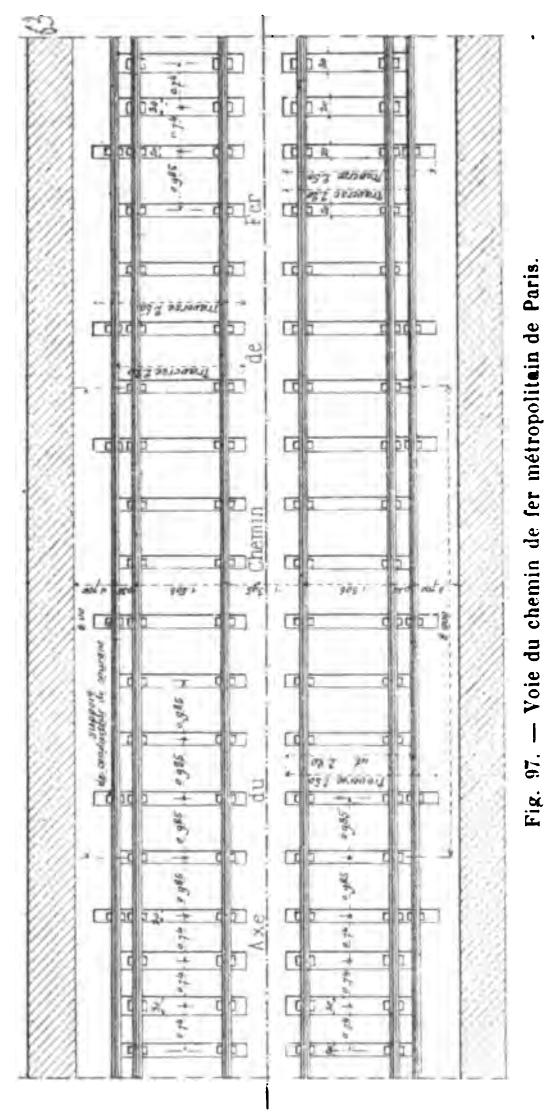


Fig. 97. — Voie du chemin de fer métropolitain de Paris.

sième rail. Toutefois ces difficultés sont loin d'être insurmontables. On fait également remarquer qu'en cas de déraillement les

voitures sont plus difficiles à remettre sur les rails. Mais les déraillements sont heureusement très exceptionnels et ils ne se produisent que rarement en voie courante.

Les rails Vignole conviennent bien pour la pose sur longrine ; mais, pour éviter les déversements, il faut rapprocher beaucoup les tire-fonds.

On a combiné également (au Central London par exemple) des rails spéciaux pour pose sur longrine (fig. 100). Ce sont des rails

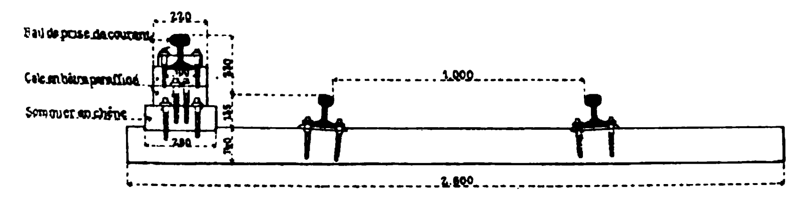


Fig. 98. — Voie de chemin de fer électrique du Fayet à Chamonix.

à évasement, genre Barlow ou autres. Dans le cas du Central London un tel rail permettait en outre de gagner quelques centimètres dans le sens de la hauteur, ce qui n'était pas à dédaigner, étant donné que la ligne est constamment souterraine et tubulaire.

Des rails genre Barlow peuvent aussi être employés pour le passage des ouvrages d'art.

Nous n'avons eu en vue, dans tout ce qui précède, qu'une voie de chemin de fer, à plate-forme complètement indépendante. S'il s'agit d'un chemin de fer d'intérêt local ayant, sur certaines parties de son parcours, le caractère d'un tramway, on devra, sur ces sections spéciales, le considérer, au point de vue de la voie, comme un véritable tramway. Par conséquent, au lieu d'une voie à rails saillants, qui devient inapplicable dans une traverse, on fera usage, de rails noyés dans les chaussées (rails à gorge). Nous renvoyons, pour tout ce qui concerne l'établissement de telles voies, à notre ouvrage : *Les Tramways électriques*[1].

[1] *Les Tramways électriques*, 2e édition. Béranger, éditeur.

Lorsque la voie doit être établie sur un ouvrage métallique on doit faire en sorte qu'elle en soit isolée conformément aux prescriptions de l'Instruction du 25 juin 1895. Le but est, dans ce cas, d'éviter que le courant ne passe dans le métal pour en sortir en un point déterminé. Or, comme nous le dirons plus loin, il est toujours à craindre que, là où le courant quitte une masse métallique, il ne produise des actions électro-chimiques tendant à attaquer le métal.

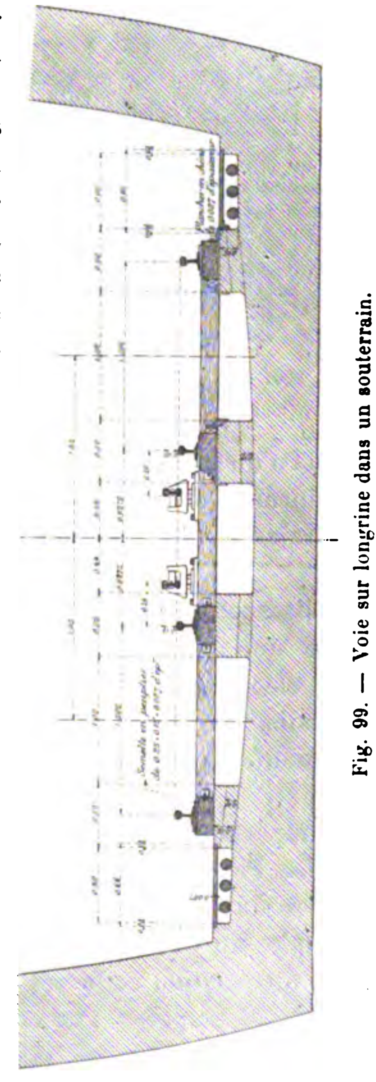


Fig. 99. — Voie sur longrine dans un souterrain.

La voie d'un chemin de fer électrique s'établit généralement au gabarit normal. On y trouve cet avantage de pouvoir loger plus commodément les moteurs sous la caisse des voitures. Il est d'ailleurs à remarquer que, dans la plupart des cas, la question ne se pose même pas, puisque ce sont généralement des chemins de fer existants que l'on transforme et que cette transformation se trouve ordinairement dictée par un accroissement de trafic, qui exigerait plutôt un élargissement qu'une diminution du gabarit. La voie de 1 mètre n'a été adoptée que dans des cas spéciaux (chemins de fer de montagne, chemin de fer de l'exposition de 1900, chemins de fer d'intérêt local avec alimentation par usine

hydro-électrique, etc.). Le métropolitain électrique de Paris avait été prévu avec la voie de 1,30 m. largeur que l'on ne rencontre nulle part. La raison était que l'on voulait éviter toute intrusion possible du matériel des grandes lignes sur ce chemin de fer, dont le caractère devait être nettement municipal. Mais la loi du 30 mars 1898, qui a autorisé le travail, a imposé une largeur de voie normale, soit 1,44 m. Malheureusement le tunnel n'a été établi que pour des voitures de 2,40 m. de largeur, type incommode et qui limite d'une façon très fâcheuse la capacité des trains pendant les heures de grande affluence.

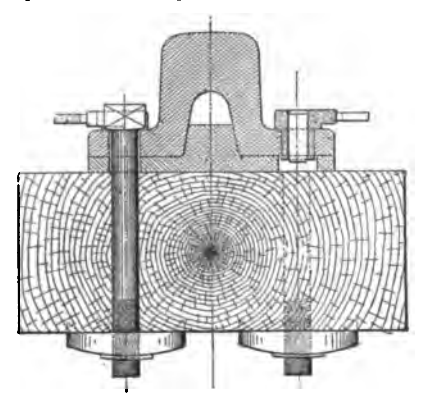


Fig. 100. — Rail longrine du Central London.

Éclissages électriques. — Ces éclissages sont indispensables parce que les éclissages mécaniques ne constituent pas un joint électrique suffisant. Le jeu qui existe entre les boulons et les rails, les oxydations qui se produisent sous l'influence de l'humidité, créent des résistances qui s'opposent au passage du courant.

L'importance des éclissages dépend de l'intensité du courant à écouler. Par conséquent, ils seront d'autant plus simples que la tension du courant de distribution sera plus élevée. Soit, par exemple, un train consommant 250 ampères moyens à 500 volts. Si la distribution se faisait à 5 000 volts, le débit ne serait plus que de 25 ampères. Par conséquent il passerait dans les rails dix fois moins d'électricité que dans le premier cas et la section des éclissages électriques pourrait être réduite dans le rapport 1 à 10.

On doit bien se rendre compte que la trop grande résistance d'une voie n'a pas seulement pour effet d'augmenter la différence de potentiel existant entre les extrémités de la ligne ; bien qu'il s'agisse d'un courant de retour, elle entraîne des pertes d'énergie intervenant, au point de vue du rendement, au même titre que les pertes dans les conducteurs de distribution.

Les inconvénients d'une trop grande différence de potentiel aux extrémités de la ligne sont que le courant de retour cherche alors à s'écouler par les conduites d'eau ou de gaz situées à proximité. Il les suit jusqu'à se rapprocher de l'usine ou d'une partie de la voie moins résistante et les abandonne, alors, en traversant le sol. Or celui-ci contient des substances chimiques qui, sous l'action du courant, se décomposent. De l'oxygène est transporté généralement au point d'émission et corrode le métal.

L'éventualité de décompositions électrolytiques est un objectif qu'il ne faut jamais perdre de vue en matière de tramways. Pour un chemin de fer, la préoccupation peut être moins grande, parce que la voie est sur une plate-forme indépendante et qu'il n'y règne généralement ni conduite d'eau, ni conduite de gaz. Mais la question a toujours de l'importance et il sera bon de ne jamais la négliger[1]. Il peut y avoir d'ailleurs des cas (chemin de fer d'intérêt local, par exemple) où la voie sera établie sur les chaussées mêmes et où elle deviendra, par suite, tout à fait assimilable, au point de vue des décompositions électrolytiques possibles, à une voie de tramway.

Les éclissages électriques sont constitués par des tiges ou des câbles en cuivre qui relient les rails de part et d'autre des joints.

La jonction de ces éclissages avec les rails doit être faite avec

[1] Rappelons, à ce sujet, que la règle généralement suivie, en matière de tramway, est celle du *volt kilométrique*, c'est-à-dire que la perte de charge kilométrique, le long de la voie ferrée, ne devra pas dépasser 1 volt. Toutefois, dit l'*Instruction du 25 juin 1895*, une perte de charge supérieure pourra, dans certains cas particuliers, être autorisée.

un très grand soin. En général les rails arrivent à pied d'œuvre munis des trous dans lesquels doivent s'enfoncer les têtes des

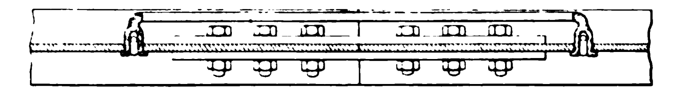


Fig. 101. — Rail Bond Chicago.

éclissages. On devra toujours nettoyer ces trous à vif, afin que le contact du cuivre et de l'acier soit absolument net. Il est indispensable, également, que la tête de l'éclissage soit serrée très énergiquement contre le rail. On assure ce contact mécanique dans des conditions satisfaisantes, en prenant non une tête pleine, mais une tête évidée dans laquelle, quand l'éclisse a été mise en place, on enfonce un coin en acier (Rail bond Chicago) (fig. 101). Ce coin s'enfonce du côté extérieur à l'éclis-

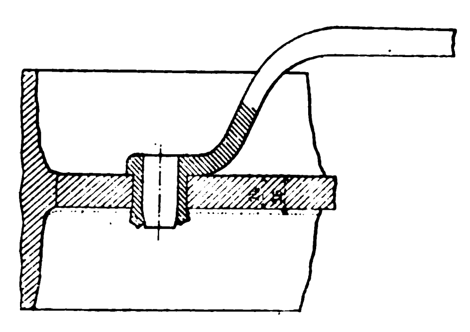


Fig. 102. — Éclisse avec tête creuse. (Milan à Varèse).



Fig. 103. — Éclisse à tête creuse, avant mise en place de la cale.

sage électrique. Si, par suite de la disposition de la voie, on

éprouve des difficultés à procéder de la sorte, on emploiera une tête en forme d'anneau qui permet d'enfoncer le coin du côté même de l'éclisse (fig. 101, 102, 103, 104).

Les têtes des éclisses n'ont pas seulement pour objet la fixation mécanique des éclisses dans l'âme ou le patin des rails. Elles forment un élargissement qui diminue la densité du courant



Fig. 104. — Éclisse à tête creuse, après mise en place de la cale.

dans la petite zone du rail qui entoure la tête de l'éclisse. On se rend bien compte, en effet, que le courant de retour qui, entre deux joints, utilise, pour son passage, la totalité de la section du rail est obligé, près des joints, de converger vers la tête des éclisses. En ces points la densité augmente et il peut se dépenser inutilement de l'énergie sous forme de chaleur.

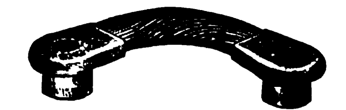


Fig. 105. — Éclisse Crown.

On devra donc toujours proportionner la tête de l'éclisse à l'intensité moyenne du courant de retour. Par conséquent, pour les chemins de fer électriques, qui comportent des courants de retour souvent très intenses, il faudra des têtes d'éclisses beaucoup plus fortes que pour un tramway. Comme il y a, à ce point de vue, une certaine limite pratique à ne pas dépasser, on sera amené non seulement à doubler les éclisses, comme dans un tramway (ce qui assure le passage du courant dans le cas de

rupture accidentelle de l'une d'elles), mais même à les tripler et à les quadrupler.

Quand la voie comporte des rails très pesants on doit, concurremment, et pour la bonne résistance de la voie, employer des éclisses mécaniques assez longues (à six boulons, par exemple). Par conséquent avec des éclisses électriques, fixées dans l'âme des rails, lesquelles doivent chevaucher de part et d'autre de l'éclisse mécanique, on s'expose à une dépense de cuivre assez élevée. On pourra alors employer très avantageusement des éclisses analogues à celle que représente la fig. 105 et qui se fixeront dans les patins des rails (fig. 106). Ces éclisses sont du

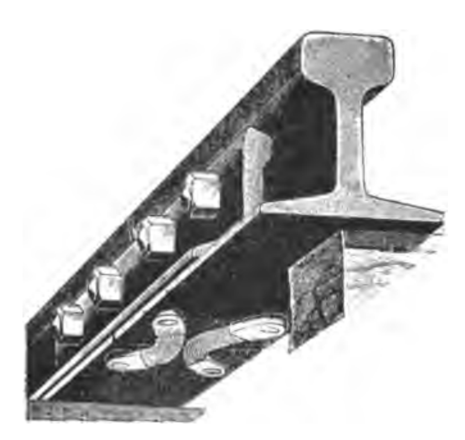


Fig. 106. — Éclisse Crown sous le patin du rail.

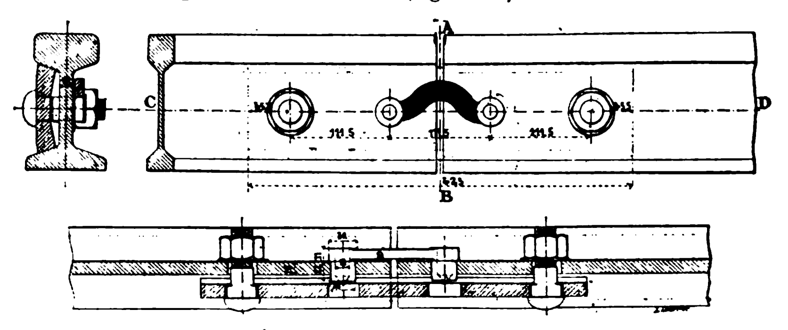


Fig. 107. — Éclisse Crown reliant les âmes des rails.

type Crown. Le même modèle peut également se placer sous les éclisses des rails, ce qui est à considérer, quand on a à craindre le vol des tiges ou des câbles de cuivre réunissant les têtes des éclisses électriques (fig. 107).

Quel que soit le système d'éclisses électriques adopté, il est indispensable que celles-ci puissent supporter, sans se rompre, les vibrations occasionnées par le passage des trains, ainsi que les petits mouvements qui se produisent aux joints des rails, quand les roues passent d'un rail à un autre. Elles doivent également pouvoir se prêter aux variations de longueur des rails que

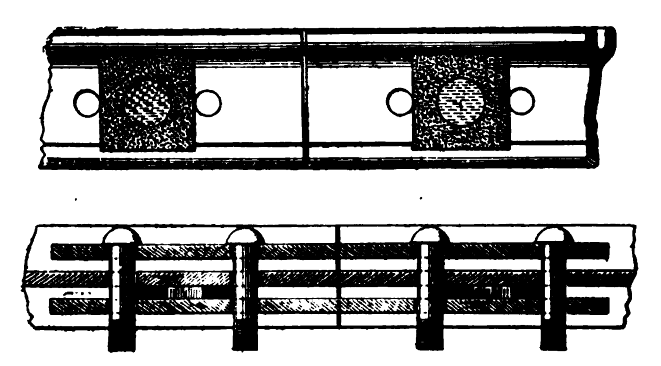


Fig. 108. — Plastic rail Bond.

produisent les inégalités de la température. Par conséquent il faut que les éclisses électriques jouissent, au point de vue mécanique, d'une certaine élasticité. Aussi, quand on fera usage de barres ou de tiges, devra-t-on les prendre plus longues qu'il ne serait strictement nécessaire, en les repliant vers le patin du rail. Comme, malgré cela, ces barres ou ces tiges sont souvent plus rigides qu'il ne le faudrait, on leur substitue avantageusement des câbles ou des rubans de cuivre. D'ailleurs, à partir d'une certaine section, les tiges de cuivre ne sont plus très maniables; le modèle courant des tramways qui est, somme toute, d'un emploi très commode, est généralement insuffisant pour un chemin de fer, en raison de l'intensité du courant à écouler et c'est une raison de plus pour ne pas chercher à s'y attacher.

Eclissages plastiques et à amalgame. — Il est certain que si

les éclisses mécaniques s'appliquaient bien exactement contre les rails, l'éclissage électrique serait beaucoup moins nécessaire. Pour obtenir un excellent contact on a songé à intercaler entre les rails et les éclisses mécaniques une substance plastique inoxydable et non attaquable par l'eau. Avant de l'appliquer on nettoie à vif les surfaces entre lesquelles elle doit être maintenue. On la retient d'ailleurs, latéralement, par une rondelle en liège ou en feutre qui s'aplatit par le serrage (fig. 108). Bien entendu la matière plastique doit être appliquée des deux côtés du joint, c'est-à-dire sur chacun des deux rails à réunir. L'éclisse elle-même sert de jonction électrique.

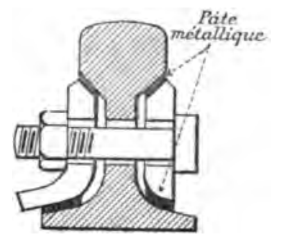


Fig. 109. — Eclissage plastique du chemin de fer à courants triphasés de Thoune à Burgdorf.

Le *plastic rail bond*, comme on désigne en Amérique le joint ci-dessus, a été surtout employé pour des lignes de tramways où l'on paraissait avoir principalement en vue d'empêcher le vol des éclisses en cuivre. Il a l'inconvénient de ne pouvoir être commodément surveillé et, au surplus, pour un chemin de fer, il peut donner une résistance trop grande, la section des éclisses étant sensiblement inférieure à celle du rail.


Fig. 110. — Joint plasti-cuprique.

Signalons cependant, comme joint plastique analogue, celui qui a été adopté par la maison Brown, pour l'éclissage électrique des rails du chemin de fer de Thoune à Burgdorf. Comme le montre la figure 109, le joint se fait aux points de serrage des éclisses mécaniques et du rail, par l'intermédiaire d'une pâte métallique, qui serait un mélange de vaseline et de zinc en poudre.

Nous devons également une mention au *joint plasticuprique*,

dont on fait un certain cas en Amérique et qui se compose de deux mamelons d'amalgame, que l'on applique de part et d'autre du joint (fig. 110). Ces mamelons sont pris dans une plaque de cuivre servant de conducteur électrique. Quant au contact, il est assuré par des ressorts qui viennent presser contre les mamelons et qui sont logés dans deux cavités ménagées dans une plaque de liège recouvrant tout le joint. En serrant les boulons de l'éclisse on agit sur les ressorts qui compriment énergiquement les mamelons et les mettent en contact parfait avec le rail (fig. 111). Au préalable, on décape soigneusement les surfaces d'application.

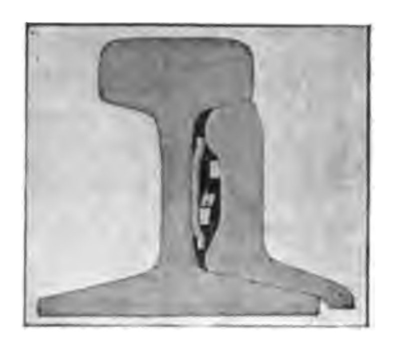


Fig. 111. — Serrage des pastilles plasti-cupriques contre le rail.

Enfin nous citerons, comme système intermédiaire, l'éclissage

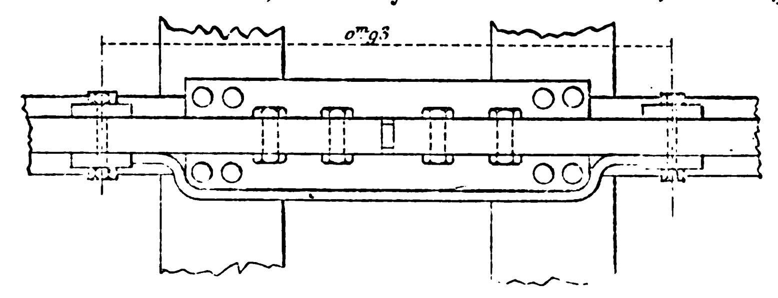


Fig. 112. — Joint à amalgame du chemin de fer du Fayet à Chamonix.

à amalgame du chemin de fer du Fayet à Chamonix (fig. 112 et 113). Il se compose de deux câbles en cuivre de 24 millimètres de diamètre et de 0,95 m. de longueur, soudés à leurs extrémités à de petites plaques de fonte, que des boulons appliquent sur le rail, après qu'il a été décapé et amalgamé. De tels joints ne peuvent être réellement efficaces que s'ils ont été exécutés avec un très grand soin. M. Auvert, ingénieur principal à la Cie P. L. M.

explique, à ce sujet, dans la *Revue générale des Chemins de fer*, que la résistance du troisième rail, pour une longueur de 1 mètre prise de chaque côté du joint, s'élevait, au début de l'exploitation, à 0,000294 ohm et qu'après revision des joints elle est descendue à 0,000075 ohm, en moyenne. Cette résistance est encore élevée et il ne semble pas que les autres avantages du système soient tels, surtout pour une installation neuve, que l'on doive le préférer au *rail bond* ou au joint *crown*.

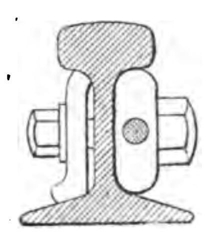


Fig. 113. — Coupe transversale du joint à amalgame du chemin de fer du Fayet à Chamonix.

Rails soudés. — Pour avoir des rails assimilables, au point de vue de la résistance électrique, à un conducteur continu, on a cherché à les rendre eux-mêmes effectivement continus en les soudant entre eux. Pour cela deux méthodes ont été employées. La première (système Johnson) consiste à souder les abouts des rails par un arc électrique très intense, que l'on produit avec le courant même de la ligne (à 500 volts). Toutefois on lui fait subir sur place une transformation qui a pour but d'abaisser sa tension (à 3 ou 4 volts) et d'augmenter son débit. La soudure d'un joint demande généralement à ligne un courant de 350 ampères. On la facilite en faisant fondre par l'arc une certaine quantité d'un morceau d'acier, que l'on place, au cours de l'opération, sur le joint.

Dans le *procédé Falk* les deux abouts des rails sont pris dans une masse de fonte que l'on vient couler dans un moule entourant le joint (fig. 114 et 115). Ce moule, qui est également en fonte, a sa surface munie d'un mélange d'huile et de plombagine, en vue de faciliter le démoulage. On a soin, quand on le place, de bien mettre les deux rails dans le même alignement. On les maintient d'autre part dans cette situation à l'aide d'une presse qui empêche tout soulèvement, quand on verse la fonte en fusion et qu'alors les extrémités des rails se dilatent. La fonte

en fusion provient elle-même d'un cubilot, monté sur roues et que l'on déplace à la demande de l'atelier de soudure.



Fig. 114. — Joint Falk avant soudure.

Des joints soudés par l'un ou l'autre des deux procédés décrits



Fig. 115. — Joint Falk après soudure.

ci-dessus seraient évidemment extrêmement avantageux sur une ligne de chemin de fer électrique, d'abord parce qu'ils suppri-

meraient les martelages qui se produisent aux joints (martelages qui sont aussi nuisibles pour les rails eux-mêmes que pour le matériel), et ensuite parce qu'ils amélioreraient la conductibilité électrique de la voie ; malheureusement il faut compter avec les variations de longueur que produisent, dans les rails, les variations de la température. On sait que, pour permettre à ces variations de s'exercer, les rails sont posés avec un joint de quelques millimètres et que, d'autre part, les trous de boulons des éclisses ont une section légèrement ovale, afin de permettre de petits déplacements longitudinaux. Avec des joints pleins, si le rail se dilate, il doit se comprimer lui-même, ce qui est à la vérité possible, s'il est bien retenu longitudinalement, comme c'est le cas pour une voie de tramway encastrée dans une chaussée. Mais, sur un chemin de fer, le rail est moins bien tenu dans le sens longitudinal, n'étant fixé, en somme, que par les tire-fonds. Aussi, plutôt que de se comprimer, il se gondolera et la voie deviendra sinueuse. Cet effet sera d'autant plus à redouter que la voie d'un chemin de fer est généralement plus exposée aux intempéries qu'une voie de tramway.

Il semble donc qu'il n'y aurait même pas eu lieu d'accorder dans cet ouvrage une place quelconque aux rails soudés, si une classe importante de chemins de fer électriques n'était constituée par des métropolitains souterrains électriques. Dans ce cas, les variations de la température ne dépassent pas quelques degrés et les dilatations des rails, comme leur contraction, ne sont plus à redouter. Des joints soudés pourraient donc très bien convenir pour ce cas spécial. Mais si l'on veut employer le système Falk, il faudra trouver un moyen efficace de se débarrasser rapidement des gaz toxiques ou irrespirables que produit le cubilot. Il est vraisemblable que, dans ce cas spécial, la soudure électrique serait d'un emploi plus pratique.

Dispositions complémentaires pour assurer le retour du courant

par les rails. — Quel que soit le soin avec lequel on ait effectué l'éclissage électrique d'une voie de chemin de fer, on doit envisager, comme possible, la rupture d'un éclissage et même (par exemple en cas de réparation urgente) l'interruption totale du circuit de retour dans l'une des voies. Par conséquent on devra, pour une même voie, relier par un câble en cuivre les deux fils de rails de distance en distance (tous les 2 à 300 mètres) (fig. 116), et prévoir, en outre, un certain nombre de jonctions entre les deux voies. Pour ces jonctions il est fait usage de tiges en cuivre ou

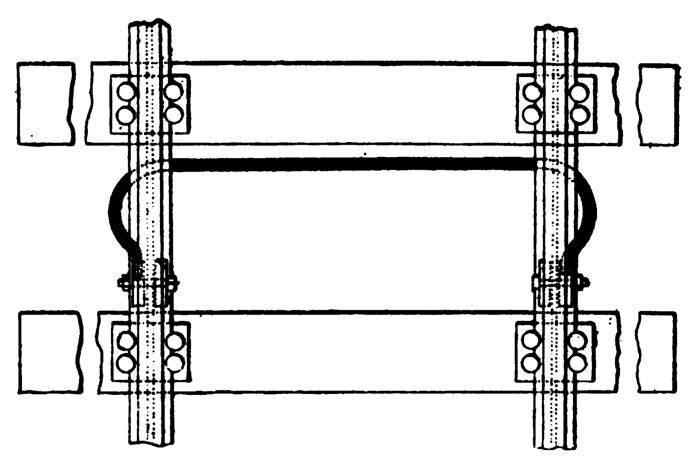


Fig. 116. — Jonction entre les rails de retour.

mieux de câbles fixés aux rails comme s'il s'agissait d'éclisses électriques.

Les voies ainsi éclissées et reliées ne suffisent pas toujours pour assurer un bon écoulement du courant de retour, Il ne faut pas oublier, en effet, que, sur un chemin de fer, les courants sont autrement intenses que sur une ligne de tramways. Si R est la résistance électrique de la voie et I l'intensité du courant de retour, la perte de tension dans les rails sera RI et la perte d'énergie RI^2. Pour une même résistance R ces deux facteurs interviennent donc l'un proportionnellement à I et l'autre pro-

portionnellement au carré de I. Par conséquent, si I augmente, la différence de potentiel entre les extrémités de la voie augmentera (ce qui pourra provoquer des décompositions électrolytiques) et la perte d'énergie (qui se traduit par du charbon brûlé inutilement à l'usine) augmentera encore davantage. Si donc on veut que, malgré la grande valeur de I, les coefficients RI et RI^2 restent dans des valeurs admissibles, il faudra venir soulager les rails et les débarrasser, par des conducteurs spéciaux, du courant en excès. Ces conducteurs spéciaux sont des *feeders de retour*. Ils ramènent directement le courant à l'usine, lui évitant ainsi la résistance de la voie. A la vérité ils ont eux-mêmes une certaine résistance électrique. Mais, comme ils sont constitués par des câbles en cuivre, on peut, en augmentant leur diamètre, diminuer autant que l'on veut cette résistance, alors que celle de la voie ne peut évidemment pas s'abaisser au-dessous de la résistance qui correspond au type admis pour les rails.

Le point d'attache des feeders de retour, la détermination de leur diamètre doivent toujours faire l'objet d'une étude très attentive. Si on laisse de côté la question des différences de potentiel (c'est-à-dire des décompositions électrolytiques), moins importante pour un chemin de fer que pour un tramway, et que l'on n'envisage que la question économique, il est clair que les feeders de retour n'auront d'intérêt qu'autant que l'économie annuelle (en énergie) qu'ils permettront de réaliser sera au moins égale à la somme représentant l'intérêt et l'amortissement de la dépense que leur établissement comportera (Règle de Kelvin).

Il en résulte que plus l'électricité sera chère (et c'est généralement le cas pour les exploitations urbaines) et plus les feeders de retour s'imposeront. Comme, d'autre part, une sujétion analogue existe pour l'alimentation des lignes, on voit que l'on pourra être souvent amené, dans les exploitations à grande intensité, à multiplier ou les usines, ou, dans le cas d'un transport de force, les sous-stations.

C'est une complication sérieuse. Elle serait en partie évitée si, au lieu de courants à 5 ou 600 volts, on faisait usage de courants à haute tension puisque, pour une tension n fois plus forte, le courant serait n fois moins intense. Aussi a-t-on préconisé pour des métropolitains (le métropolitain de Londres, par exemple) des tensions directes de 3 à 5 000 volts. Sur les lignes de la Valteline on marche avec 3 000 volts ; nous verrons également le cas d'une installation à 10 000 volts (Berlin à Zossen). Enfin certains inventeurs proposent aujourd'hui des distributions à 15 000 volts.

Évidemment, avec de telles tensions, la question du courant de retour se trouve singulièrement simplifiée, même pour de très longues lignes.

On doit toutefois, à ce point de vue, signaler la différence qui existe entre les courants continus et les courants alternatifs. Les premiers n'ont à vaincre que la résistance ohmique des rails. Tandis que, dans le cas des seconds, intervient en plus la résistance due à la self-induction et aux actions mutuelles. Une basse fréquence diminue cette résistance supplémentaire. Nous verrons plus loin un exemple dans lequel la résistance ohmique de la ligne s'est trouvée triplée et ce, malgré l'emploi de courants à 16 périodes. Le faible ampérage compense heureusement cet accroissement de la résistance et, finalement, avec une tension suffisamment élevée, on arrive à une perte totale inférieure à celle qu'occasionne une distribution directe à courants continus.

Profil en long ; pentes et rampes. — Le profil en long d'un chemin de fer électrique peut être beaucoup plus accidenté que celui d'un chemin de fer ordinaire. Cela tient à ce que l'on peut donner aux trains une puissance de traction bien plus considérable que dans le cas de la traction à vapeur. En effet, comme les trains sont en liaison directe avec l'usine génératrice, ils peuvent puiser, pour ainsi dire à discrétion, dans l'énergie dont celle-ci dispose. Au contraire un train à vapeur transporte avec

lui sa propre usine et la nécessité de respecter aussi bien le gabarit, que le maximum de charge admis pour les ouvrages d'art limite forcément la puissance de la locomotive à une valeur assez faible. Si la locomotive peut remorquer, dans certains cas, des trains très lourds et très longs (4 à 500 tonnes), cela tient à ce que la traction se fait sur des parties à peu près horizontales. La même locomotive serait impuissante, si les déclivités du tracé augmentaient même légèrement.

Soit un train pesant P tonnes (sans la locomotive), à remorquer en palier. On verra que, pour faire mouvoir une tonne dans ces conditions, aux vitesses usuelles, il faudra lui appliquer un effort de traction d'environ 5 kilogrammes par tonne. Donc le train nécessitera un effort de traction de 5P kilogrammes.

Or, si la traction doit se faire non en palier, mais sur une rampe de n millimètres par mètre, il faudra ajouter au coefficient de traction en palier, c'est-à-dire à 5 kilogrammes, autant de kilogrammes qu'il y aura de millimètres par mètre de rampe. Dans le cas d'une rampe de n millimètres, l'effort de traction sera donc de $(5+n)$ P kilogrammes. Par conséquent, pour une simple rampe de 5 millimètres, l'effort de traction se trouve doublé. Pour une rampe de 40 millimètres (rampe que l'on aborde souvent dans des métropolitains), l'effort de traction à exercer sera de 45P kilogrammes, soit 9 fois plus que ce qu'il est en palier.

D'autre part, une locomotive pesant p tonnes a, comme limite de l'effort de traction réalisable, le septième de son poids adhérent exprimé en kilogrammes. Comme le poids adhérent n'atteint que tout à fait exceptionnellement les 2/3 de p, il s'en suit que si l'on veut faire remorquer à une locomotive à vapeur un train pesant 150 tonnes, sur une rampe de 40 millimètres par mètre, on devra avoir au moins

$$2/3\ 1\,000\,p\,\frac{1}{7} = (150 + p)\ 45.$$

Nous disons, au moins, car non seulement il ne faut pas s'ap-

procher trop près de la limite de patinage et nous avons, d'autre part, assimilé la locomotive, au point de vue de l'effort de traction, à des voitures remorquées, ce qui, ainsi que nous le verrons plus loin, est une évaluation trop favorable.

On tire de la formule ci-dessus :

$$p = 135 \text{ tonnes.}$$

Ainsi il faudrait employer, pour le cas considéré, une locomotive d'un poids tout à fait anormal. Et, ce qui est plus grave, c'est que cette machine pèserait à peu près autant que le matériel à remorquer ; en sorte que la puissance à développer serait double de ce que nécessiteraient les voitures, si elles étaient automotrices.

Cet exemple suffit pour bien montrer l'inconvénient des locomotives en matière de traction, et l'on conçoit qu'avec l'électricité on ait cherché à l'éviter, en employant des voitures automotrices.

On voit, d'autre part, qu'avec la traction électrique, on est beaucoup moins limité par les rampes qu'avec la traction à vapeur[1]. Théoriquement si, dans le cas du train pesant P tonnes, considéré ci-dessus, on rendait tous les essieux moteurs, l'effort de traction que l'on pourrait exercer serait de $\frac{1\,000\,P}{7}$ kilogrammes ; la rampe maxima qu'il sera alors possible de gravir, se déduira de l'équation

$$\frac{1\,000\,P}{7} = P\,(5 + n)$$

d'où

$$n = 136 \text{ milimètres.}$$

Mais on ne devra pas se risquer à aborder des rampes pareilles : d'abord parce que le démarrage en rampe (il peut devenir à un moment nécessaire) serait excessivement pénible ; ensuite parce que la descente serait trop dangereuse, les freins ordinaires n'offrant pas une sécurité suffisante.

[1] Nous constaterons, en outre, qu'avec certains moteurs on peut récupérer, dans les pentes, une partie de l'énergie consommée pour gravir les rampes.

Sur les lignes de tramways on considère comme un grand maximum une rampe de 100 millimètres par mètre. Avec des trains, qui pèsent beaucoup plus, il faudra être plus circonspect et ne dépasser que, dans des conditions bien particulières, 50 à 60 mm.

Quand le tracé obligera à adopter des rampes plus accentuées, on devra recourir à d'autres moyens qu'à la traction par simple adhérence, notamment à la traction par crémaillère, dont il sera parlé dans un chapitre spécial.

On recommande de ménager entre deux rampes consécutives de sens inverses une partie assez longue en palier et d'adoucir les rampes à leurs sommets comme à leurs extrémités. Cette précaution, qui s'explique d'elle-même, évite, en particulier, qu'une voiture, passant d'une rampe sur une autre, ne soulève la voiture qui vient derrière elle.

Sur les lignes où les stations sont très rapprochées (un métropolitain par exemple) et où il importe néanmoins de réaliser une vitesse commerciale élevée, le démarrage des trains présente, au point de vue de la consommation de courant, une importance prépondérante. Cette question sera analysée plus loin, mais on fera remarquer, de suite, qu'il y a un intérêt évident, dans ce cas, à régler le profil en long de telle façon que les démarrages puissent se faire en pente. Sur le *Central London*, au départ de chaque station, on a ménagé une pente de 30 millimètres par mètre; le résultat a été que l'on a diminué de moitié l'intensité maxima que l'usine génératrice aurait eu à fournir, si le démarrage s'était fait, en palier, avec la même accélération[1].

Dans un ordre d'idée analogue, il y a intérêt à prévoir une rampe à l'arrivée, afin de faciliter le freinage (d'où une moindre dépense d'air comprimé et une usure moindre des freins et des bandages). Au Central London, l'arrivée aux stations se fait,

[1] Tramway and Railway World (novembre 1900).

comme le départ, par une rampe de 30 millimètres par mètre.

Ainsi donc, au point de vue du profil en long, la disposition-type d'une station est d'être à cheval sur une rampe d'accès et une pente de départ. Mais, par suite de sujétions locales, un tel arrangement est souvent bien difficile à réaliser. Sur le Central London le problème s'est trouvé simplifié du fait que la ligne est à grande profondeur et que l'on pouvait, par conséquent, surélever très aisément le niveau des stations par rapport au niveau général de la ligne.

Courbes. — Les courbes-limites à adopter dépendent plutôt du matériel employé que du système de traction. Cependant le matériel électrique aborde mieux les courbes que du matériel à vapeur.

La tendance de plus en plus marquée est au matériel à bogies dont les qualités ne sont plus à démontrer. Pour en assurer la stabilité on donne à l'empattement des bogies un peu plus que la largeur de la voie, soit de 1,80 m. à 2 mètres. Or, même avec des empattements aussi réduits, on peut trouver la place, dans le cas des automotrices, pour loger dans chaque bogie deux moteurs d'une centaine de chevaux chaque. C'est généralement plus qu'il n'en faut pour la puissance à développer. On peut alors facilement passer dans des courbes s'abaissant jusqu'à 60 mètres de rayon.

Avec la voie de 1 mètre on pourrait descendre jusqu'à 30 mètres.

Les tramways électriques passent aisément dans des courbes de 17 à 20 mètres, même avec la voie de 1,44 m.; mais ils doivent alors ralentir très sensiblement leur allure, sujétion qu'il faut évidemment s'éviter dans le cas d'un chemin de fer.

Nous n'avons rien de spécial à signaler sur le *devers*. Il ne faut pas craindre dans les courbes très raides de lui donner un peu plus que n'indiquent les formules théoriques (page 345).

D'autre part, en vue de faciliter le passage dans les courbes, on

pourra donner un léger surécartement à la voie[1]; en même temps on se mettra à l'abri, par l'installation d'un contre-rail, contre toutes chances de déraillement.

[1] Lorsque le passage est trop dur, on graisse parfois la face intérieure du rail extérieur avec un mélange de graisse et de plombagine. Mais c'est un palliatif dont il vaut mieux pouvoir se dispenser par l'emploi d'un matériel approprié, car, appliqué sans soin, il aggrave le mal, en diminuant l'adhérence et faisant patiner les locomotives ou les automotrices.

CHAPITRE IV

DISTRIBUTION DE L'ÉLECTRICITÉ LE LONG DES VOIES

Principes généraux. Troisième rail. Modes d'isolation. Éclissages mécaniques et électriques. Dispositions spéciales. Frotteurs de prise de courant Cas de l'alimentation à 3 et à 5 fils. Distribution de l'électricité par conducteurs aériens. Courants continus. Distribution à 3 et à 5 fils. Courants alternatifs; monophasés ou triphasés. Courants triphasés à basse tension (Thoune à Burgdorf). Courants alternatifs simples à haute tension. *a*) Système Œrlikon. *b*) Système Westinghouse. Courants triphasés à haute tension.

Principes généraux. — Nous avons déjà fait connaître les principes généraux de la distribution de l'électricité le long des voies et indiqué que les systèmes en usage pouvaient, en définitive, se classer comme il suit :

Le *troisième rail* pour les courants continus de 5 à 700 volts environ, les *conducteurs aériens* pour les courants continus de 5 à 700 volts environ, mais de faible intensité et pour les courants alternatifs (monophasés ou triphasés) à haute et basse tension.

L'emploi d'un troisième rail, qui tend à se généraliser de plus en plus, est cependant une complication sérieuse pour le service de la voie et de l'exploitation. La présence, au ras du sol, d'un conducteur au potentiel de 5 à 700 volts, si elle ne constitue pas un grand danger pour le personnel (le choc produit par de tels courants n'étant pas mortel), peut être une cause de courts circuits, soit que les ouvriers laissent tomber accidentellement un outil en fer sur le rail, soit que les trains entraînent sur le rail des fils métalliques abandonnés sur la voie[1]. Il est clair, d'autre

[1] En revanche cette « aptitude » de la voie aux courts circuits, c'est-à-dire à une

part, qu'avec un troisième rail, un déraillement se trouvera aggravé, un arc électrique pouvant alors s'établir entre les voitures et le troisième rail.

Aux aiguillages et aux croisements, le troisième rail doit être forcément interrompu (fig. 117). Pour assurer l'alimentation des trains il faut munir les locomotives ou les automotrices de deux frotteurs, placés de telle façon que lorsque l'un d'eux est dans la section où le troisième rail est interrompu, le courant puisse encore arriver par l'autre. La zone interrompue du troisième rail

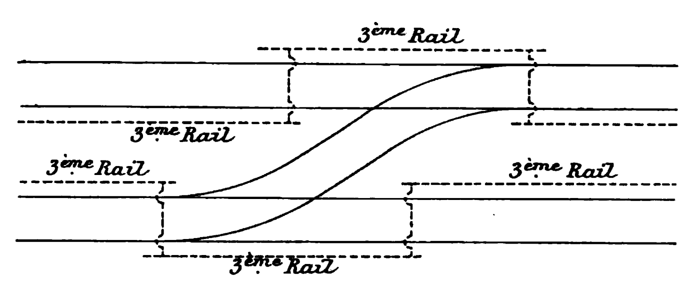


Fig. 117. — Disposition du 3e rail aux aiguillages.

ne doit donc pas dépasser une certaine limite qui correspond à l'écartement maximum possible des frotteurs. A la vérité, quand le train contient plusieurs automotrices, la question se simplifie, puisque les deux automotrices ne sont pas, en même temps, sur la section interrompue. Mais, dans le cas de la traction par locomotive ou par automotrice unique, le sectionnement du troisième rail peut présenter, parfois, de sérieuses difficultés.

Le sectionnement du rail est ennuyeux à un autre point de vue. Lorsqu'un des frotteurs a abandonné l'une des sections, il

suppression momentanée du courant, par suite du fonctionnement des disjoncteurs automatiques de l'usine, a pu être parfois utilisée. Sur un certain chemin de fer électrique d'Italie, une automotrice, laissée sans surveillance, s'était emballée, à la suite de la manœuvre imprudente d'un ouvrier visiteur. Le chef de gare a évité une catastrophe en jetant, à cheval sur le rail conducteur et le rail de roulement, une grosse barre de fer. La voiture, ne recevant plus de courant, s'arrêta d'elle-même.

doit aborder l'autre en vitesse. Or, forcément, un frotteur doit avoir un certain jeu vertical, afin de bien peser toujours sur la table de roulement. En arrivant de nouveau sur le troisième rail il se trouve légèrement en contre-bas de celui-ci, ayant descendu un peu dans la partie vide, et, par conséquent, un choc va se produire. Pour éviter la rupture ou l'arrachement du frotteur, certaines dispositions doivent donc être prises. Généralement on se contente d'abaisser les abouts du rail, de telle façon qu'à son origine le rail se trouve encore au-dessous du frotteur et on effectue le raccordement avec la partie courante par un plan incliné allongé. Le choc est ainsi fortement atténué. Mais il n'en existe pas moins, surtout aux grandes vitesses, et il faut bien en tenir compte pour la détermination des différentes parties constitutives du frotteur.

Si le troisième rail est une complication pour les croisements et les aiguillages, il est encore plus gênant dans les dépôts et les remisages, où de nombreuses manœuvres doivent être faites à bras d'homme et où il faut pouvoir manutentionner facilement tout l'appareillage que comportent la visite et l'entretien des voitures. Aussi fera-t-on bien, pour ces cas spéciaux, de substituer au troisième rail des conducteurs aériens. Ceux-ci seront d'ailleurs d'autant plus admissibles que, toutes les manœuvres se faisant à vitesse très ralentie, le courant à débiter n'aura qu'une faible intensité. Les voitures devront donc être munies d'un petit trolley ou d'un archet. Une recommandation intéressante est de faire en sorte que le courant ne puisse être à la fois sur le trolley et sur les frotteurs, car ceux-ci resteraient en charge et pourraient provoquer des courts circuits.

On peut se demander si, dans les gares, on ne devrait pas opérer de la même façon. L'expérience prouve qu'il n'y a pas lieu de recourir à cette complication; d'abord parce que la voie peut être interdite rigoureusement au public et que l'on peut, au surplus, placer le rail conducteur, comme nous le verrons plus loin,

dans une sorte de gaine protectrice (fig. 118). Tout au plus pourrait-on avoir recours aux conducteurs aériens dans une gare terminus importante, là où les aiguillages présentent une grande complication et dans le cas où le personnel, pour des besoins de service, serait dans la nécessité de circuler beaucoup sur les voies. Dans ce cas la voiture (ou la locomotive) devrait être munie, indépendamment du frotteur de prise de courant pour troisième rail, d'un trolley ou d'un appareil analogue pouvant venir en contact avec les conducteurs aériens (fig. 119).

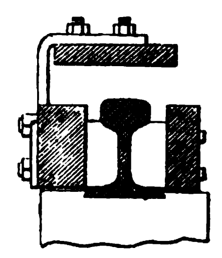


Fig. 118. — Protection du 3e rail dans les gares. (Chemin de fer du Fayet à Chamonix).

Le troisième rail n'a servi jusqu'ici que pour la distribution des courants continus à basse tension (de 5 à 700 volts). On ne peut guère songer à l'employer pour les courants triphasés à basse tension, parce qu'il faudrait alors lui adjoindre un quatrième rail. Quant aux courants alternatifs simples à basse tension, ils pourraient bien, au point de vue de l'isolement, être distribués par un troisième rail, avec retour par les rails de roulement, mais leurs alternances créeraient généralement, dans ces derniers, des effets d'induction inacceptables.

Pour les hautes tensions (courants continus ou alternatifs), le troisième rail ne convient plus, son isolement se trouvant alors insuffisant et les dangers d'électrocution devenant trop sérieux pour le personnel [1].

La distribution du courant par *conducteurs aériens* est certainement plus simple que par un troisième rail. On peut admettre alors les plus hautes tensions ; en outre, s'il s'agit de courants continus ou de courants alternatifs simples, on n'a plus à se préoccuper ni des croisements, ni des aiguillages. En prenant le cou-

[1] A partir de 700 volts, l'isolation du troisième rail devient difficile et les pertes d'énergie par les isolateurs, lesquelles sont insignifiantes avec des tensions inféieures, augmentent rapidement.

rant par un archet ou une tige frottante on évitera, en ces points spéciaux, toute discontinuité des conducteurs. Avec des courants



Fig. 119. — Voiture avec prise de courant pour conducteur aérien ou pour 3e rail.

triphasés, les aiguillages et les croisements doivent être isolés; mais cette difficulté a été maintes fois résolue d'une façon satisfaisante.

On peut craindre, à la vérité, la chute d'un conducteur sur la voie. Mais un accident de cette nature est extrêmement rare, si la ligne est bien surveillée. Il existe actuellement des milliers de kilomètres de tramways électriques avec conducteurs aériens, c'est-à-dire des milliers de kilomètres de fils électriques, sus-

pendus au milieu des rues et, cependant, les accidents dus aux chutes de fils sont, par rapport aux accidents ordinaires de l'exploitation, dans une proportion tout à fait infime.

Pour les chemins de fer il y a encore cette atténuation que, si un fil se rompait, il ne tomberait vraisemblablement sur personne, ne provoquant alors qu'un court circuit et une chute de disjoncteur à l'usine. En admettant même qu'un train se trouvât juste au-dessous de lui, à ce moment précis, il y aurait, par les roues, communication directe du conducteur avec les rails et tout se bornerait probablement à un court circuit [1].

Il est clair que les conducteurs distribuant l'électricité (qu'il s'agisse d'un troisième rail ou de conducteurs aériens) sont inutilement en charge quand aucun train n'est en contact avec eux. La sécurité serait évidemment plus grande, s'ils ne restaient électrisés qu'au moment du passage des trains. Cet objectif a suscité des inventions nombreuses qui, malheureusement, n'ont pas eu jusqu'ici la sanction de la pratique. Dans un ordre d'idées analogue on a cherché à alimenter les conducteurs par sections correspondant, par exemple, aux cantonnements d'un block-system. Mais là encore on s'est heurté à des difficultés considérables, provenant de l'intensité et de la répétition des ruptures de courant à établir. Cependant, à ce point de vue, les inventeurs n'ont certainement pas dit leur dernier mot.

Comme variante, nous citerons l'application possible à la traction des chemins de fer de la distribution de l'électricité par *plots*. On sait que ce système a été employé avec plus ou moins de succès à la traction des tramways. Il consiste à répartir, le long de la voie, des plots métalliques isolés qui ne s'électrisent qu'au moment seulement où ils sont couverts par la voiture. Un long frotteur, placé sous la voiture motrice, recueille l'électricité; l'es-

[1] Sur la ligne de la Valteline, comme on le verra plus loin, une disposition spéciale permet d'isoler tous les conducteurs situés au-dessus d'une gare, dès le départ du train.

pacement des plots est tel, d'autre part, qu'au moment où le frotteur va quitter l'un des plots, il soit déjà sur le plot suivant. Quant à la mise en charge momentanée des plots, elle est assurée soit par des appareils placés dans les plots (Diatto, Dolter), soit par des distributeurs qui commandent tout une série de plots (Vuilleumier).

C'est un système analogue à ce dernier dont on préconiserait l'emploi pour les chemins de fer, mais en ayant recours à la haute tension. Les plots seraient espacés de 80 à 100 mètres, soit un peu moins que la longueur d'un train, et l'on établirait deux séries de plots ; l'une pour l'aller, l'autre pour le retour du courant. Des distributeurs seraient placés, par exemple tous les kilomètres et communiqueraient avec un câble général d'alimentation régnant le long des voies. Contrairement à ce qui se passe pour les tramways, tous les plots commandés par un même distributeur seraient mis en charge simultanément. On fait remarquer que cette électrisation des plots ne pourra avoir d'inconvénients, parce qu'elle ne durera que pendant le temps mis par le chemin de fer à parcourir la section électrisée (souvent moins d'une minute) ; que, d'autre part, le personnel aura son attention appelée sur cette électrisation passagère des plots soit par des signaux, soit par l'approche du train et qu'au surplus la distribution par deux séries de plots rendra tout contact avec l'un d'eux absolument inoffensif. En raison de la haute tension employée, les distributeurs n'auront à couper et à établir que des courants de faible iutensité. Enfin, en admettant même qu'il se produise une certaine déperdition d'énergie par les plots, quand ils sont en charge, celle-ci sera probablement encore inférieure à la déperdition que produirait un troisième rail, qui reste constamment en charge et dont le nombre de supports est d'au moins une centaine par kilomètre.

Un tel système n'a pas encore été pratiquement réalisé[1] et il

[1] Ce système pourrait s'appliquer aussi bien aux courants continus qu'aux courants monophasés ou triphasés. Dans ce dernier cas, cependant, il faudrait trois

est à craindre que les distributeurs ne fonctionnent pas toujours avec une régularité suffisante, ou encore qu'ils n'occasionnent des dépenses d'entretien élevées. Mais si nous avons tenu à en parler, c'est pour pouvoir insister sur ce fait, que la distribution de l'électricité pour la traction des chemins de fer ne doit pas être considérée comme pouvant être l'objet d'une formule définitive. Sur ce point, comme d'ailleurs sur tous ceux concernant cette vaste et nouvelle application de l'électricité, bien des progrès pourront être encore réalisés.

Troisième rail. — Le troisième rail peut être axial, c'est-à-dire placé dans l'axe de la voie, ou latéral.

La première disposition a l'avantage de mieux dégager l'assiette du chemin de fer; mais, comme le rail doit dépasser les rails de roulement de toute la hauteur des isolateurs qui le supportent, il se trouverait souvent trop élevé par rapport au matériel roulant, notamment par rapport aux moteurs, dont la carcasse inférieure s'abaisse souvent jusqu'à une dizaine de centimètres au-dessus du ballast.

Une autre sujétion provient des frotteurs de prise de courant qui doivent être assez bas pour prendre contact avec le rail axial, mais qui, alors, risquent de provoquer des courts circuits au passage des croisements et des aiguilles. Aussi le rail axial n'est-il guère employé que dans des cas spéciaux, par exemple pour des chemins de fer tubulaires ; car, alors, l'espace dont on dispose sur les côtés de la voie est très réduit et doit être complètement réservé pour la circulation du personnel.

Le *rail latéral* se place à peu près à l'aplomb de la limite du

rangées de plots, à moins que l'on n'accepte le retour par les rails. Avec les courants monophasés on pourrait envisager l'emploi de distributeurs-transformateurs, c'est-à-dire de distributeurs abaissant la tension du courant. Enfin on pourrait, grâce au sectionnement de la ligne, appliquer le très intéressant système de distribution par série et courants continus à haute tension (Thury) en mettant, sur une certaine longueur de ligne, les trains en série les uns sur les autres.

matériel roulant, généralement du côté intérieur de la voie, afin de dégager complètement les accotements extérieurs. Par conséquent, avec une ligne à double voie, c'est dans la zone comprise entre les deux voies que régneront les deux rails électriques. Il n'y a que des avantages à éloigner le troisième rail des rails de roulement. S'il en était trop rapproché, il suffirait de la moindre avarie à l'un des isolateurs pour provoquer un court circuit entre le rail électrique et les rails de la voie[1]. Au contraire quand il en est à une certaine distance, la destruction d'un isolateur ne provoque pas un court circuit franc, la traverse et le ballast créant une certaine résistance entre le rail électrisé et les rails de retour. Dans un ordre d'idées analogue il y a intérêt à placer le troisième rail un peu haut afin d'augmenter son isolement par rapport à la voie.

Le troisième rail est constitué généralement par un rail en acier, identique aux rails de la voie. Mais c'est là une pratique défectueuse, attendu que l'objet à remplir n'est pas du tout le même dans les deux cas. Alors que la qualité principale des rails de roulement est la dureté, ce qui implique une constitution chimique telle que la résistance des rails est environ dix à douze fois celle du cuivre, le troisième rail peut être constitué par un métal plus doux, puisqu'il n'a à supporter que le frottement de l'appareil de prise de courant et, il est intéressant qu'il présente, d'autre part, une résistance électrique aussi réduite que possible. A ce dernier point de vue, on obtiendra un résultat favorable en diminuant la proportion de manganèse que contient généralement l'acier à rails. Nous donnerons plus loin la composition chimique des nouveaux rails du Manphattan Railway et grâce à laquelle la résistance a pu été diminuée d'environ 30 p. 100 de ce qu'elle eût été avec les rails ordinaires de roulement.

[1] Ces courts circuits sont toujours assez effrayants. S'ils n'ont pas une intensité telle qu'ils fassent tomber le disjoncteur de l'usine, arrêtant le courant et par suite l'exploitation, ils produiront une flamme très violente. susceptible de mettre le feu aux traverses et à toutes matières combustibles situées à proximité.

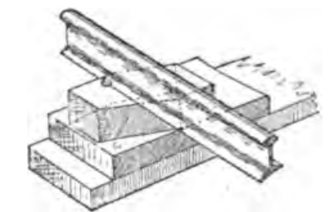
Si le troisième rail doit différer des rails de roulement au point de vue de la constitution chimique, il n'y a également aucune raison pour qu'il ait aussi le même profil. Un rail, qui doit simplement supporter un frotteur, n'a pas du tout besoin d'avoir la même forme qu'un rail sur lequel doivent circuler des wagons. Il est donc plus convenable d'adopter pour le troisième rail la forme qui permet de simplifier le plus les isolateurs. Une grande section sera, d'ailleurs, d'autant plus désirable que, pour distribuer le courant, on ne disposera que de deux rails, alors que l'on en aura quatre pour le retour à l'usine.

Modes d'isolation. — Les isolateurs sont de types très divers. On peut en constituer de très économiques, simplement par des blocs de bois paraffiné qui seront boulonnés ou tirefonnés, sur les traverses, tous les quatre mètres environ, et sur lesquels le troisième rail sera fixé soit par des tire-fonds, si c'est un rail Vignole, soit par l'intermédiaire d'un coussinet si c'est un rail à double champignon. La traverse de support devra être un peu plus longue que les autres, ou bien on se servira d'une traverse ordinaire que l'on désaxera légèrement vers l'un des côtés de la voie.

Si l'on se contentait de fixer le bloc en bois paraffiné sur la traverse, par des tire-fonds, par exemple, on mettrait la surface horizontale du bloc, c'est-à-dire un point voisin du rail électrique en communication par ces tire-fonds avec la traverse. L'isolement serait, dans ces conditions, très peu satisfaisant. Aussi est-il bon d'intercaler entre les traverses et l'isolateur une cale en bois, également paraffiné, et sur laquelle l'isolateur est tirefonné, mais sans que les tire-fonds puissent traverser la cale.

On pourrait craindre que de tels isolateurs ne soient pas toujours suffisants, surtout par les temps humides ou pluvieux. Mais l'expérience prouve qu'ils se comportent très bien par la pluie. On sait, d'ailleurs, que l'eau de pluie est très peu conductrice de l'électricité. A la vérité, le bois paraffiné n'est pas un isolant de

premier ordre. Mais il faut bien remarquer qu'il ne s'agit pas, en l'espèce, d'obtenir un isolement télégraphique. En admettant même un isolement assez faible, la perte d'électricité qui peut en



Vue perspective de l'isolateur.

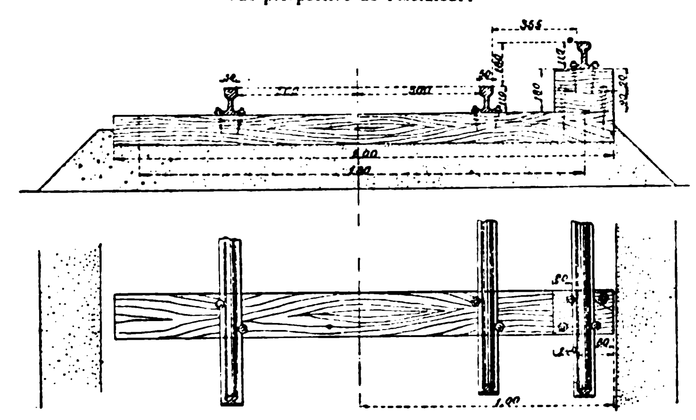


Fig. 120. — Voie avec 3e rail de chemin de fer de l'Exposition de 1900.

résulter n'a qu'une importance négligeable par rapport à l'ensemble de la consommation et, d'autre part, la simplicité et la résistance mécanique de l'isolateur font qu'il n'y a pas à craindre que la situation ne s'aggrave subitement d'une façon inquiétante.

La figure 120 montre comment avait été effectué très simplement l'isolement du troisième rail du chemin de fer de l'Exposition de 1900, à Paris. On avait pris la précaution d'enduire la cale en bois paraffiné d'une couche de peinture isolante. Ces isolateurs, qui avaient 0,18 m. de hauteur, étaient placés, tous les 3,50 m., sur l'extrémité des traverses (fig. 120 et 121). La même disposition avait été adoptée pour les parties en viaduc. Le rail

conducteur était identique aux rails de la voie, c'est-à-dire qu'il était du type Vignole et pesait 25 kilogrammes au mètre courant.

Les figures 123 et 124 concernent un type analogue, mis en service sur la ligne du Fayet à Chamonix. M. Auvert, ingénieur principal à la Cie P. L. M. qui a donné dans la *Revue générale des Chemins de fer*[1] une description complète de la ligne du Fayet à Chamonix, dit au sujet de ce mode d'isolement du troisième rail : « L'isolement du conducteur de prise de courant par des cales en bois paraffiné est très efficace et parfaitement suffisant. Les fuites de courant sont inférieures à 1 ampère par kilomètre, il a été en outre constaté ce fait curieux que, loin d'augmenter par temps de pluie ou de neige, elles diminuent un peu. Il nous semble qu'on peut l'expliquer de la manière suivante : les pertes par défaut d'isolement sont dues d'une part à la conductibilité extrêmement faible de la matière des supports en bois paraffiné, et, d'autre part, à la conductibilité superficielle de ces supports sur lesquels se déposent des poussières diverses. Lorsque les supports isolants sont lavés par l'eau de pluie les poussières sont entraî-



Fig. 121. — 3e rail du chemin de fer de l'Exposition de 1900.

[1] *Revue générale des Chemins de fer*, avril 1902.

nées et la deuxième cause disparaît. Quant à l'eau de pluie elle-

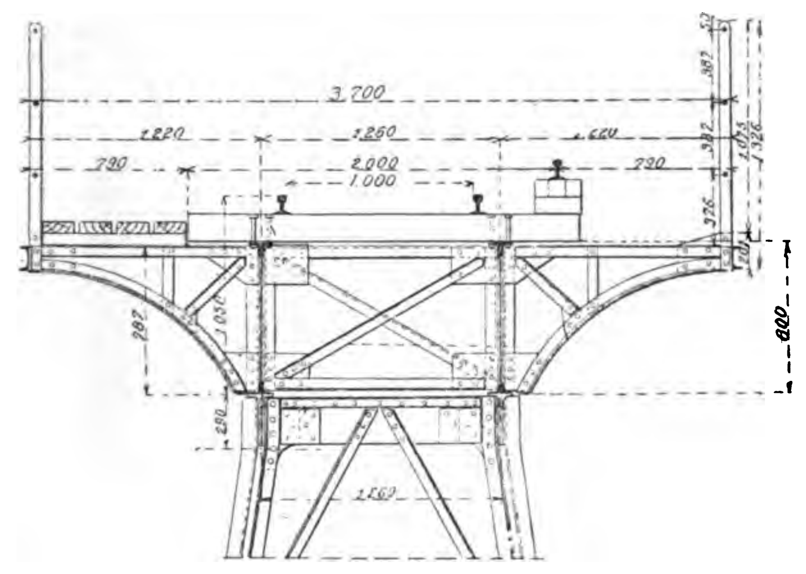


Fig. 122. — 3e rail du chemin de fer de l'Exposition de 1900 (parties en viaduc).

même qui mouille les supports isolants, elle n'occasionne pas de

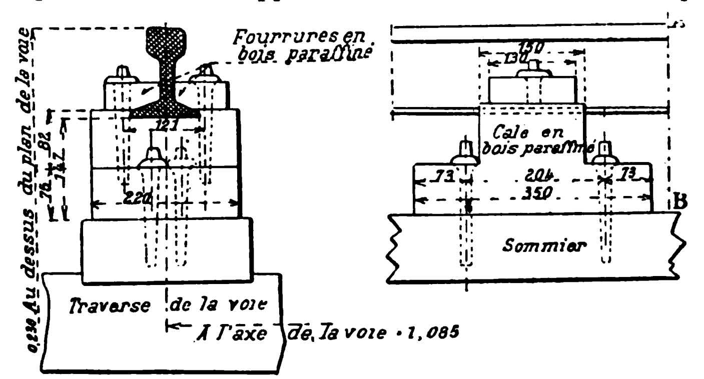


Fig. 123. — Isolateur pour 3e rail du chemin de fer du Fayet à Chamonix.

perte appréciable parce que, en raison de la grande pureté de l'atmosphère dans la région de Chamonix, elle est presque chi-

miquement pure et ne contient pas de traces de substances ammoniacales ou acides et est, par suite, fort peu conductrice ».

La figure 125 montre, indépendamment du troisième rail, un rail axial, mais qui ne sert nullement pour la distribution du courant.



Fig. 124. — 3e rail du chemin de fer du Fayet à Chamonix.

C'est un rail uniquement employé pour le freinage, les voitures étant munies, à cet effet, d'un frein à sabot très énergique qui vient prendre appui sur ce rail axial.

La Cie des Chemins de fer de l'Ouest a également adopté sur sa ligne des Invalides à Versailles, un isolateur en bois paraffiné. Comme le montre la figure 126, cet isolateur est complété par des

joues en bois, qui abritent latéralement le rail conducteur.

Enfin nous trouvons également un mode d'isolation du troi-



Fig. 125. — Voie du chemin de fer du Fayet à Chamonix avec 3e rail et rail axial pour le freinage.

sième rail par le bois sur la ligne de la Cie d'Orléans, allant du quai d'Orsay au quai d'Austerlitz (Paris). L'isolateur est constitué

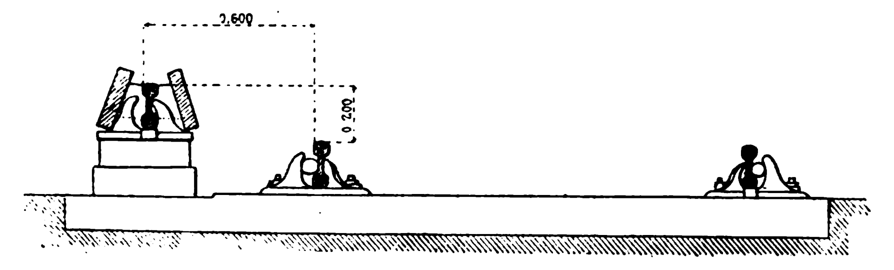


Fig. 126. — Isolateur pour 3e rail du chemin de fer des Invalides à Versailles.

par un blochet en bois bitumé, tirefonné par son pied sur les traverses (fig. 127 et 128). Le troisième rail a été doublé, afin d'augmenter la conductance de la distribution. Latéralement et hori-

zontalement, le rail est protégé par des planches en bois prenant appui sur un boulon traversant les rails et trois cales qui les maintiennent dans leur position respective. Cette protection en bois existe même en voie courante (fig. 129).

L'isolation du troisième rail par le bois paraffiné ou bitumé est évidemment un peu primitive et l'on peut craindre qu'elle ne s'altère avec le temps. Aussi a-t-on souvent préféré, notamment en

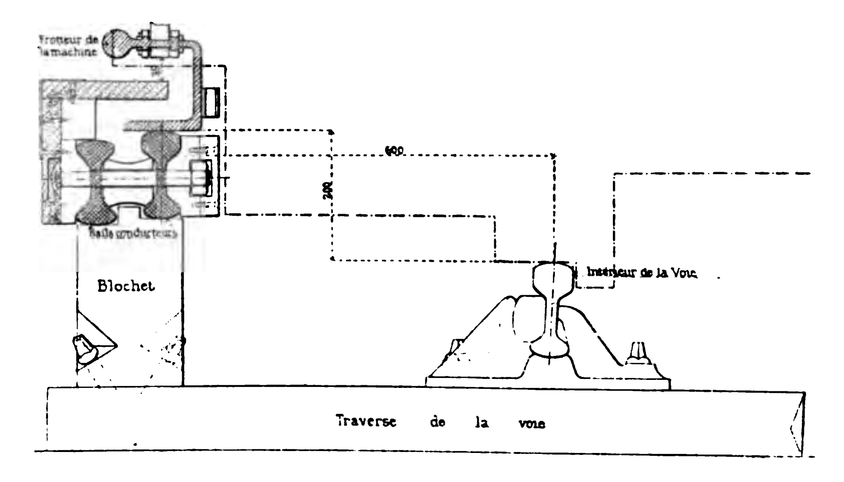


Fig. 127. — Isolateur pour 3e rail du chemin de fer d'Orléans.

Amérique, placer le troisième rail sur des isolateurs en matière isolante (verre, porcelaine, ambroïne, granit reconstitué, etc.). On peut ainsi obtenir un isolement tout à fait satisfaisant; mais on doit encore porter toute son attention sur les efforts mécaniques qu'ont à subir les isolateurs, car, s'ils sont considérables, la matière isolante ne pourrait généralement pas les supporter. Ces efforts sont de plusieurs sortes : d'abord intervient le poids du rail qui, sur une ligne chargée, atteint facilement 50 à 60 kilogrammes par mètre courant. Ensuite il se produit un effet d'arrachement au passage des trains, quand une traverse d'isolateur, insuffisamment bourrée, fléchit sous la charge. Le rail conduc-

teur, qui se trouve à l'extrémité de la traverse, descend encore davantage. Mais, comme il est retenu par les deux isolateurs



Fig. 128. — 3e rail du chemin de fer d'Orléans.

voisins, il oppose sa rigidité à ce mouvement et arrache ou disloque l'isolateur du milieu. A défaut d'un arrachement total, le passage répété des trains ébranle peu à peu la matière isolante et met finalement l'isolateur à la terre :

Il est donc indispensable que l'isolateur et le rail jouissent l'un par rapport à l'autre d'une certaine indépendance, non seulement d'ailleurs en vue des efforts mécaniques que nous venons d'indiquer, mais aussi pour permettre les dilatations et contractions que produisent les variations de la température.



Fig. 129. — Voie courante avec 3e rail du chemin de fer d'Orléans.

La figure 130 montre le type d'isolateur qui est en usage sur la ligne de Milan à Varèse. La partie isolante A est en grès; elle est surmontée d'un chapeau en fonte muni d'ergots pour retenir le rail de contact. D'autre part, elle repose simplement sur son support et peut se déplacer par rapport à celui-ci soit dans le sens vertical, soit légèrement dans le sens horizontal. Le rail de contact pèse 45 kg. par mètre courant; sa longueur est de 12 mètres. Les isolateurs sont d'autre part espacés de 4 mètres. La surélévation du rail de contact par rapport aux rails de rou-

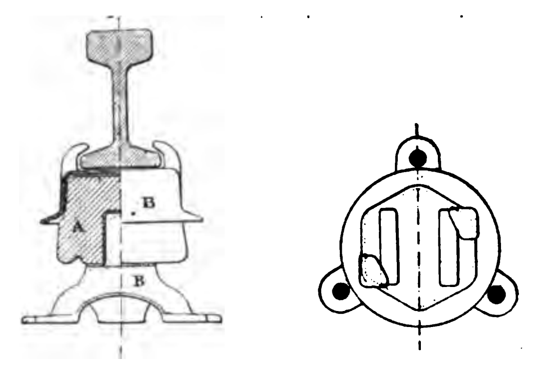


Fig. 130. — Isolateur pour 3e rail de la ligne de Milan à Varèse (plan, élévation et coupe).

lement est de 190 millimètres et sa distance au rail de roulement le plus voisin est de 675 millimètres (fig. 131).

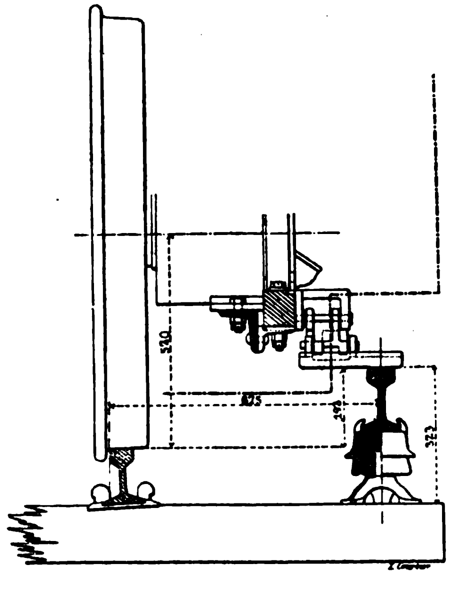


Fig. 131. — 3e rail du chemin de fer de Milan à Varèse.

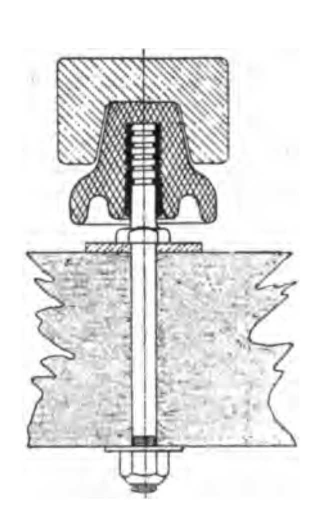
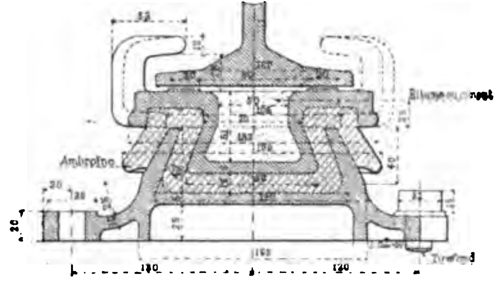


Fig. 132. — Isolateur et 3e rail du Central London.

L'isolateur du Central London (rail axial) est constitué par une

cloche isolante, vissée sur un boulon traversant une entretoise en bois, placée perpendiculairement à la voie (fig. 132). Le rail, en forme d'U renversé, est simplement posé sur la tête d'un isolateur dont il épouse la forme. La distance des isolateurs est de 2,50 m. environ.



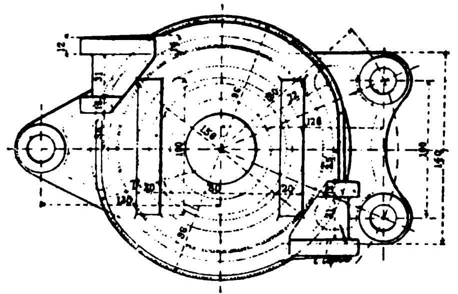


Fig. 133. — Isolateur pour 3e rail du chemin de fer métropolitain de Paris.

Sur le Métropolitain de Paris (nouvelles lignes), on a adopté un isolateur à large base, pouvant se fixer sur les traverses par trois tire-fonds (fig. 133). La base et le chapeau sont en fonte; entre les deux est placée la matière isolante (ambroïne) qui leur est soudée, mais qu'il eut mieux valu laisser indépendante.

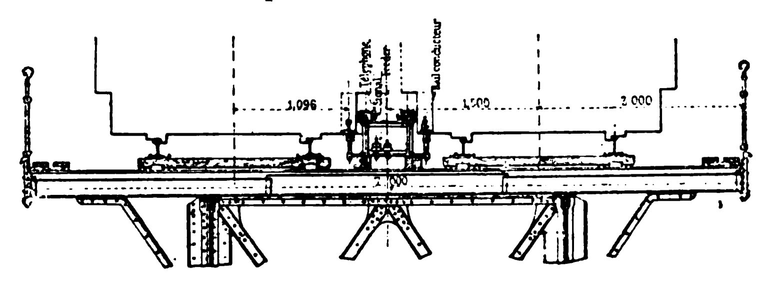


Fig. 134. — Chemin de fer métropolitain de Berlin. 3e rail dans les parties en viaduc.

Le chapeau est muni d'ergots, qui laissent entre eux et le rail conducteur un certain jeu, et permettent à celui-ci de se dépla-

cer soit dans le sens vertical, soit dans le sens horizontal. Les rails de roulement, en acier doux (alors que les rails de la voie sont en acier dur) sont des rails Vignole pesant 52 kilogrammes au

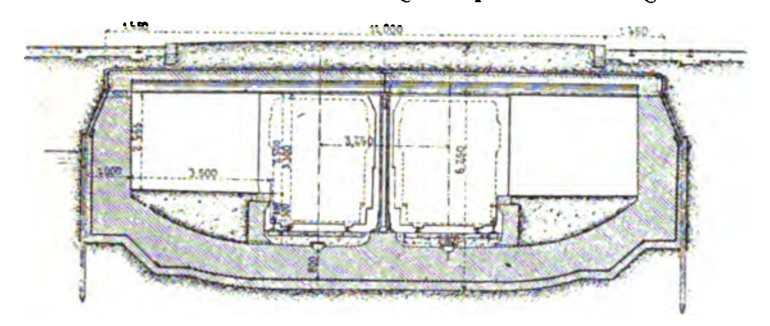


Fig. 135. — Chemin de fer métropolitain de Berlin. 3e rail dans les stations.

mètre courant et ayant des longueurs de 18 mètres. Ils sont placés à 0,36 m. des rails de la voie, ce qui est plutôt insuffisant.

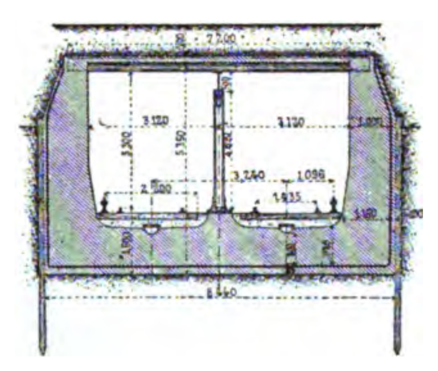


Fig. 136. — Chemin de fer métropolitain de Berlin. 3e rail dans les parties en souterrain.

Le troisième rail du métropolitain de Berlin est à 1,096 m. de l'axe de la voie et à 0,180 m. au-dessus des rails de roulement. Il est placé soit dans l'entrevoie (partie en viaduc) (fig. 134), soit sur les côtés de la voie (partie en souterrain et stations) (fig. 135 et 136). C'est un rail Vignole de 12 mètres de longueur reposant sur des

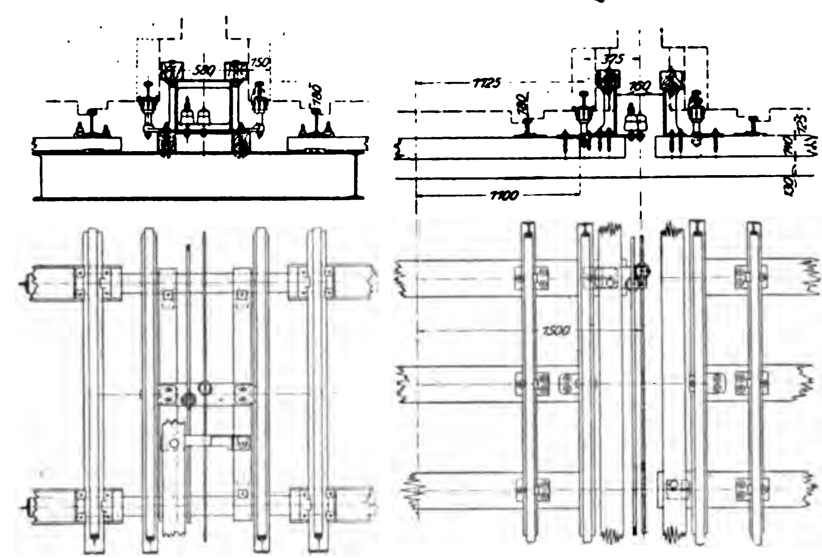


Fig. 137. — 3e rail sur les viaducs sans ballast.

Fig. 138. — 3e rail sur les viaducs avec ballast.



Fig. 139. — Chemin de fer métropolitain de Berlin. 3e rail sur les viaducs, avec ballast.

isolateurs espacés de 6 mètres et vissés sur les traverses. Si, dans les parties en souterrain, le troisième rail est placé le long des maçonneries, contrairement à l'usage ordinairement suivi, cela tient au système général de construction du tunnel qui comporte toute une ligne d'appuis axiaux. C'est dans la ligne de ces appuis que peut circuler le personnel. Sur les parties en viaduc, l'espace existant entre les deux voies est disponible ; on y a reporté le troisième rail (fig. 137, 138 et 139). On a également installé dans cette partie les feeders, qui sont logés dans un caniveau en bois et, au-dessus, les conducteurs pour les signaux.

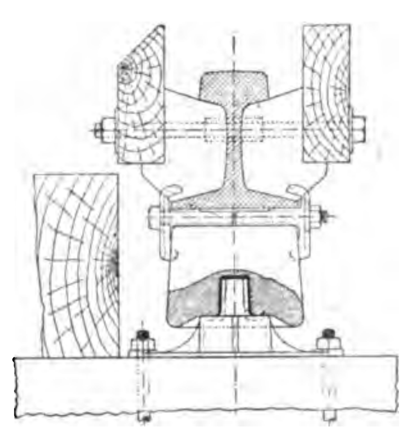


Fig. 140. — 3e rail et isolateur du Manhattan Railway (New-York).

Les Américains emploient volontiers, comme matière isolante, un produit très résistant qu'ils appellent *granit reconstitué*. Les figures 140 et 141 montrent un isolateur de ce genre existant sur le chemin de fer élevé de New-York (Manhattan Railway)[1]. L'isolateur, de forme parallélipipédique, est scellé sur un support en fonte, boulonné sur les traverses. Une sorte de griffe à doubles ergots, prenant appui sur la matière isolante, maintient le rail latéralement. Cette griffe est en deux parties que relie un boulon, de part et d'autre de l'isolateur.



Fig. 141. — Vue perspective de l'isolateur du Manhattan Railway.

Le rail, du type Vignole, pèse 45 kilogrammes par mètre cou-

[1] *Génie civil* du 27 septembre 1902. *L'Éclairage électrique* du 6 avril 1901.

rant et a une longueur de 18 mètres. Le métal qui le constitue est de l'acier très doux, ayant la composition suivante :

Carbone	0,073	p. 100
Manganèse	0,241	—
Soufre	0,073	—
Phosphore	0,069	—
Fer	99,444	—

Grâce à un tel dosage, la résistance du rail, au lieu d'être dix à douze fois celle du cuivre, n'est plus que huit fois cette résistance.

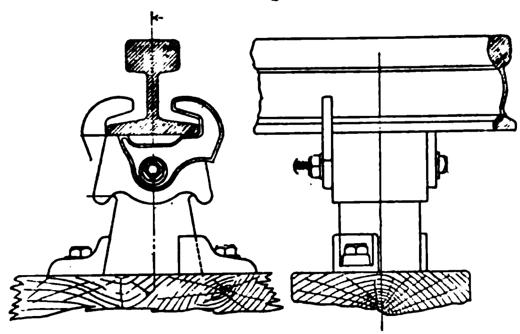


Fig. 142. — Isolateur et 3e rail du Grand rapids and Muskegon Railway.

Le rail est protégé latéralement par un double cours de madriers, maintenus en place par des cales en bois et par des boulons qui traversent à la fois les madriers, les cales et le rail. Pour que les boulons ne soient pas au potentiel de la ligne, on les fait traverser le rail dans une gaine isolante.



Fig. 143. — Vue perspective de l'isolateur du Grand rapids and Muskegon Railway.

La distance du rail conducteur au rail de roulement le plus voisin est de 0,53 m. et sa surélévation par rapport à ce rail de 0,19 m.

C'est un isolateur analogue, mais un peu plus simple, qui vient d'être employé sur le *Grand rapids and Muskegon Railway*[1] (fig. 142 et 143). Il

[1] *Street Railway Journal*, juillet 1902.

n'y a plus d'embase, l'isolateur étant simplement retenu par



Fig. 144. — Isolateur de l'Aurora Elgin Railway.

deux taquets d'angle, boulonnés sur la traverse. D'autre part les



Fig. 145. — 3e rail de l'Aurora Elgin Railway.

ergots en fonte, qui retiennent le rail, sont maintenus en place par

un boulon traversant l'isolateur, ce qui permet de placer le rail sur l'isolateur même. On conçoit combien, dans ces conditions, il est facile de changer un isolateur, même pendant le temps où le rail conducteur est en charge.

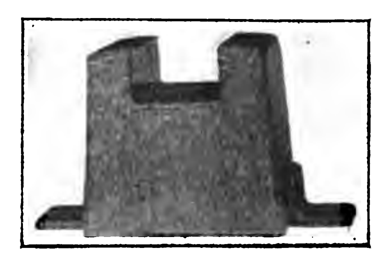


Fig. 146. — Isolateur de la General Electric Company.

Le rail conducteur est placé à 0,51 m. des rails de roulement. En certains points le rail a été doublé pour augmenter la conductibilité du circuit distributeur.

Au point de vue de la commodité du montage et du démontage du rail il faut citer l'isolateur de l'*Aurora Elgin*, qui est en trois parties : une embase en fonte, un chapeau isolant en matière « Dirigo » coiffant la tête de l'embase et sur le chapeau un socle d'appui en fonte, pour le 3e rail (fig. 144) [1]. Chapeau et socle sont maintenus en place uniquement par le poids du rail (fig. 145) qui est de 50 kilogrammes par mètre courant. Ce rail est en acier doux, à 1 p. 100 de carbone.

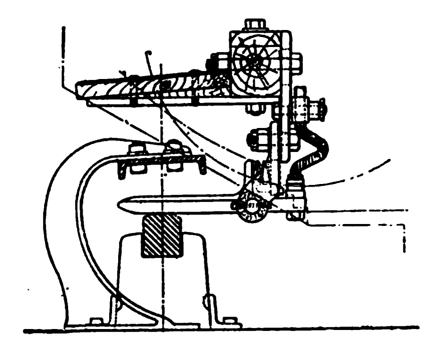


Fig. 147. — Isolateur et 3e rail de la General Electric Company.

Enfin nous devons une mention spéciale à l'isolateur de la General Electric Company [2] qui est encore plus simple que tous ceux qui viennent d'être décrits. C'est un bloc en granit reconstitué, muni d'un créneau dans lequel vient s'encastrer le 3e rail (fig. 146). Le rail a ici une forme quadrangulaire, qui se justifie parfaitement d'après les considérations précédemment

[1] Il est à noter que, sur cette ligne, les premiers isolateurs étaient en bois paraffiné.

[2] *Street Railway Journal*, août 1902.

émises (fig. 147). En outre on a cherché, comme pour l'Elevated



Fig. 148. — Protection du 3e rail (General Electric Company).

de New-York, à lui donner une composition chimique qui abaissât



Fig. 149. — 3e rail avec protection dans un dépôt.

notablement sa résistance. Celle-ci n'est plus que les six dizièmes

de celle des rails ordinaires de roulement, soit une amélioration de la conductibilité de 40 p. 100[1]. La distance du rail conducteur aux rails de roulement a été portée à 0,71 m.

Le type « General Electric » a été combiné avec un système de protection en bois ou en métal, principalement pour mettre le rail à l'abri de la neige et du verglas (fig. 148, 149, 150).

Le verglas est encore plus ennuyeux que la neige, car celle-ci



Fig. 150. — Rail avec protection, voie courante.

peut-être facilement enlevée au balai, alors que le verglas adhère au rail. Ce verglas se produit lorsqu'un temps pluvieux succède brusquement à une température inférieure à zéro. Le rail, qui est encore très froid, produit la congélation de l'eau par son contact avec elle, et celle-ci forme autour de lui une gaine adhérente et mauvaise conductrice de l'électricité. Le frotteur, en passant sur cette couche de glace, la crève en certains points, amorçant des arcs qui font fondre partiellement le patin de

[1] Ce résultat a été obtenu en diminuant, dans la composition de l'acier, la quantité de carbone et de manganèse.

frottement et projettent sur le troisième rail des gouttes de métal fondu, qui rendent sa surface rugueuse et grippante. Il en résulte qu'au passage des trains suivants le mal se trouve encore aggravé et tous les frotteurs sont mis rapidement hors d'emploi. On conçoit donc que les Américains, dont les installations ont d'ailleurs à supporter des écarts de température très considérables, aient songé à combiner un type de protection qui puisse

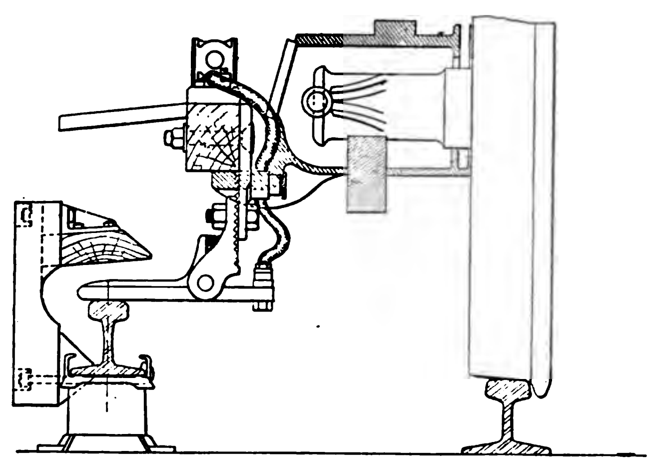


Fig. 151. — Isolateur et 3e rail avec protection de la Wilkesbarre and Hazleton C°.

mettre le troisième rail à l'abri du verglas. Dans le système de la General Electric Company (fig. 147), le rail se trouve en quelque sorte placé comme sous un couvercle, régnant à une dizaine de centimètres au-dessus de lui et sous lequel passe la palette de prise de courant du frotteur. Naturellement ce frotteur doit être combiné en conséquence. Le couvercle, qui peut se faire en bois ou en métal, est maintenu en place par des supports recourbés qui viennent prendre appui sur les traverses.

Un système analogue, mais plus économique, a été appliqué par la Wilkesbarre and Hazleton C°. Comme l'indiquent les figures 151 et 151 *bis*, la protection horizontale du 3e rail est consti-

tuée par un madrier que soutiennent tous les 2,66 m. des montants en bois, prenant appui sur le dessus de l'isolateur[1].

Dans certaines installations américaines, où l'on n'a pas cru devoir protéger le 3e rail verticalement, on a dû, néanmoins, se préoccuper de faire disparaître rapidement le verglas, quand il se produit. A cet effet, on a préconisé l'emploi du courant élec-



Fig. 151 *bis*. — 3e rail protégé, en voie courante; de la Wilkesbarre and Hazleton Cie.

trique lui-même. On débrancherait à ce moment les feeders et par suite d'une intensité plus grande circulant dans le 3e rail, ce dernier subirait une élévation de température de quelques degrés suffisante pour amener la fusion de la glace[2].

[1] *Street Railway Journal*, mars 1903.

[2] Un tel système peut, également, s'appliquer à une ligne à conducteurs aériens. Il a, en particulier, donné d'excellents résultats sur la ligne de Thoune à Burgdorf.

Sur le chemin de fer élevé de New-York, on emploie avec succès une brosse pneumatique (fig. 152). L'air n'intervient que pour la mettre en contact avec le 3e rail. Il est pris sur le réservoir de la

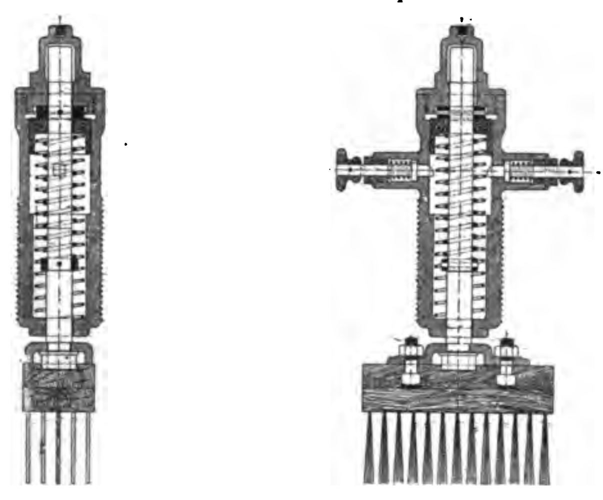


Fig. 152. — Brosse pneumatique pour enlèvement du verglas sur le 3e rail (Manhattan Railway).

voiture. Cette sorte de grattoir est préférable au frotteur à biseau qui a l'inconvénient de se briser fréquemment à la rencontre des joints des rails.

Éclissages mécaniques et électriques. — Le troisième rail doit être éclissé mécaniquement et électriquement.

A la vérité l'éclissage mécanique n'a pas besoin d'être aussi puissant que celui des rails de roulement, lequel doit assurer une continuité parfaite de la voie, mais il est néanmoins indispensable parce qu'il est nécessaire, pour le bon fonctionnement des frotteurs, que la situation respective du 3e rail et des rails de roulement ne varie pas. Si, d'autre part, le rail n'était pas suffisamment maintenu dans le sens longitudinal, il se produirait, aux joints, des petites différences de niveau qui feraient sursauter le frotteur et provoqueraient de fortes étincelles, suscep-

tibles d'altérer la surface de frottement. Dans les courbes, les éclisses mécaniques sont tout à fait indispensables. On devra même examiner si l'on ne devra pas courber les rails à chaud, afin que la courbure du rail conducteur se maintienne d'une façon parfaite, sans que ce rail ait à exercer un effort de renversement sur les isolateurs.

Comme les rails conducteurs ne sont soutenus que tous les 4 à 5 mètres et que, d'autre part, ils reposent le plus souvent librement sur les isolateurs, les mouvements dus à la dilatation et aux contractions s'exercent beaucoup plus facilement que sur les rails de roulement qui sont maintenus à chaque traverse par les tire-fonds. Aussi, sur certains chemins de fer électriques, a-t-on ménagé, de distance en distance, un joint de dilatation. Un joint de cette nature existe sur l'Elevated de New-York tous les 5 rails, c'est à-dire tous les 90 mètres.

Les éclissages électriques seront de l'un des types déjà décrits pour les rails de roulement. De préférence, on prendra des éclisses souples et comme pour une ligne à double voie, c'est-à-dire à quatre rails de retour, on ne disposera généralement que de deux rails conducteurs, il faudra proportionner la section des éclisses à l'intensité du courant à écouler.

La figure 153 montre comment se fait l'éclissage mécanique et l'éclissage électrique du 3ᵉ rail de l'Elevated de New-York. L'éclisse mécanique, de forme spéciale, recouvre deux éclisses Crown en cuivre. Deux autres éclisses en cuivre retiennent les patins des rails. Cette disposition permet, comme on le voit, d'employer des éclisses très courtes, ce qui diminue notablement le poids de l'éclissage.

La section totale des éclisses électriques du 3ᵉ rail de l'Elevated est de 885 mm^2, alors que le rail lui-même n'équivaut qu'à 790 mm^2 de cuivre. Le joint, même en tenant compte des petites pertes de charge qui se produisent dans les trous de contact, est donc un peu moins résistant que le 3ᵉ rail.

La figure 154 se rapporte à l'éclissage électrique et mécanique du joint de dilatation dont nous avons parlé précédemment. La jonction électrique est, dans ce cas, assurée par deux câbles en cuivre, suffisamment élastiques pour se prêter aux petits mouvements d'extension et de rétrécissement du joint.

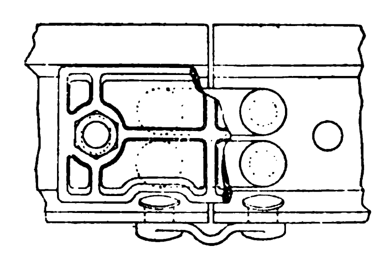


Fig. 153. — Eclissage électrique du 3e rail (Manhattan Railway).

Sur le Métropolitain de Paris, les divers tronçons du rail électrique sont reliés mécaniquement par une seule éclisse de 0,92 m. de longueur à quatre boulons ; de l'autre côté du rail, les boulons prennent appui sur des cales de 0,20 m. de longueur et de même profil que les éclisses. Les éclisses électriques, au nombre de quatre, sont constituées par des câbles en cuivre de 200 mm² chaque, munis de têtes en cuivre ajoutées que l'on enfonce dans l'âme des rails à l'aide de broches en acier.

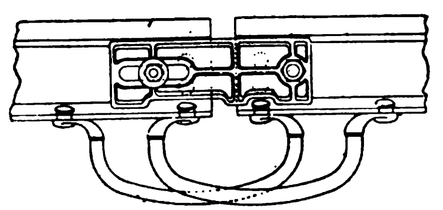


Fig. 154. Éclissage électrique du joint de dilatation (Manhattan Railway).

La figure 155 est relative aux éclissages de la ligne du Fayet à Chamonix. Cet éclissage rappelle celui de la voie ; mais il est double. On a également assuré le contact de l'éclisse et du rail par un amalgame de cuivre et d'étain.

Nous avons vu, en parlant des éclissages électriques des rails de retour, que des jonctions transversales devaient être établies de distance en distance entre les deux files de rails. Il est bon également, pour une ligne à double voie, de relier les rails conducteurs (ce que l'on appelle les mettre en parallèle). A New-York les jonctions ont lieu tous les 100 mètres.

[1] *Revue générale des Chemins de fer*, avril 1902.

Inversement on devra pouvoir, par exemple, en cas de réparation ou d'accident, isoler rapidement telle ou telle partie du

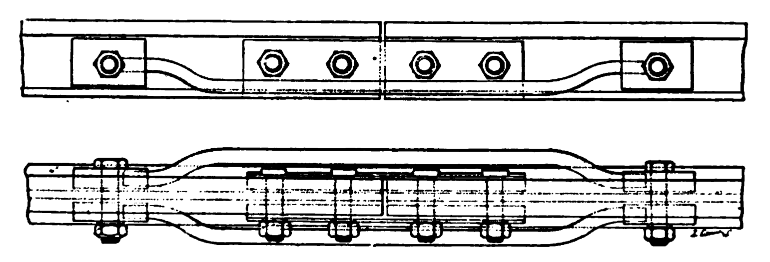


Fig. 155. — Éclissage électrique du 3e rail du chemin de fer du Fayet à Chamonix.

rail conducteur. Sur la ligne des Invalides à Versailles, on a, à cet effet, divisé le rail conducteur en sections de 1 000 mètres qui

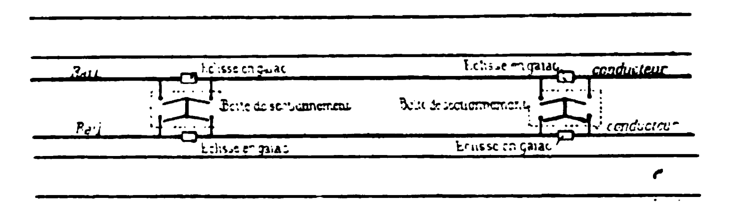


Fig. 156. — Sectionnement du 3e rail (chemin de fer de Versailles aux Invalides).

sont isolées les unes des autres par des cales isolantes en bois de gaïac[1]. Des interrupteurs placés dans des boîtes en fonte et manœuvrables par pédale permettent de laisser les rails en charge ou d'isoler l'un ou l'autre des deux rails latéraux (fig. 156).

Dispositions spéciales. — Le 3e rail doit forcément présenter des solutions de continuité, soit par suite des croisements et des aiguilles, soit par suite des passages à niveau, s'il en existe sur la ligne considérée (fig. 157). De part et d'autre de ces sectionnements, on raccordera le rail par une canalisation

[1] *Revue générale des chemins de fer.*

souterraine, qui sera constituée soit par un câble nu sur isolateurs placés dans un caniveau, soit par un câble isolé dans un conduit en bois goudronné ou créosoté, soit par un câble isolé. Ce dernier système est encore le meilleur. Le câble peut alors se placer à même le ballast. On le dénude à ses extrémités et on le

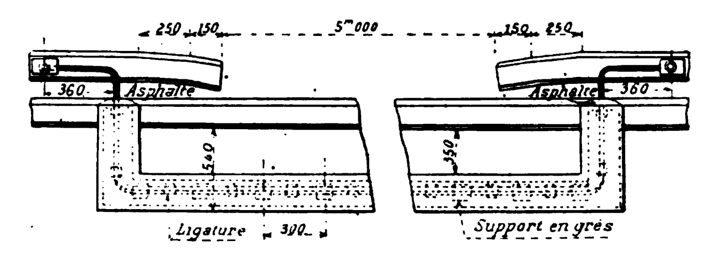


Fig. 157. Raccordement electrique du 3e rail de part et d'autre d'un passage à niveau.

soude à des cosses que l'on fixe par des boulons sur le rail conducteur. Ce câble doit avoir, bien entendu, une section suffisante pour écouler la totalité du courant qui passe dans le rail conduc-

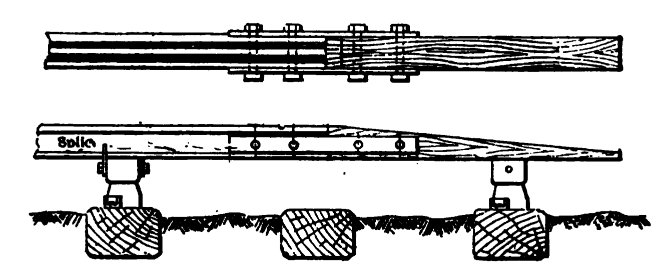


Fig. 158. — Extrémité de 3e rail avec plan incliné en bois.

teur et l'on ne devra pas perdre de vue qu'un câble isolé ne peut supporter la même densité de courant qu'un câble nu. L'attache du câble et des rails conducteurs doit être faite avec soin, en se préoccupant de protéger l'extrémité de la matière isolante contre les eaux de pluie ou autres.

Nous avons déjà dit que le sectionnement du rail conducteur obligeait à disposer les extrémités de ce rail suivant un plan incliné, afin d'empêcher l'arrachement du frotteur de prise de courant. C'est un point très important dans la distribution et l'on évitera bien des avaries, en adoptant des plans inclinés à pente très douce, permettant au frotteur de monter sans choc sur le rail, même à grande vitesse. Sur certaines lignes, on se contente de munir le 3e rail d'un avant-bec en bois (fig. 158). Mais il paraît préférable d'abaisser le rail lui-même, opération qui doit se faire, bien entendu, à la forge et non sur place (fig. 159). Si l'on manque de hauteur on pourra abaisser simplement le dessus du rail, en sciant l'âme longitudinalement et en rabattant l'extrémité de la table de roulement de toute la hauteur de la section ainsi pratiquée.

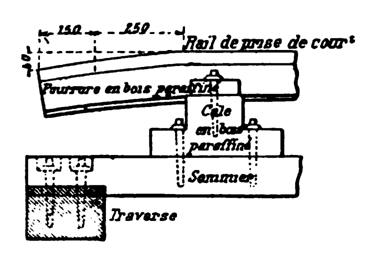
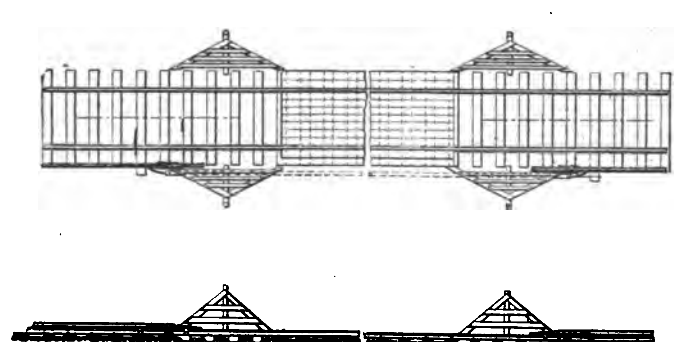


Fig. 159. — Extrémité de 3e rail avec partie inclinée pour faciliter l'attaque du frotteur.


Fig. 160. — Passage à niveau sur une ligne américaine (plan et élévation).

Lorsqu'il s'agit d'un passage à niveau, il est bon de prendre certaines dispositions pour éviter que les bestiaux ayant à traver-

ser la voie ne viennent heurter le 3e rail. On pourra faire usage, à cet effet, de petites barrières latérales. En Amérique on se contente souvent, soit de ménager en avant des extrémités des



Fig. 161. — Vue perspective du passage à niveau.

rails de petites estacades en bois, soit de disposer, de part et d'autre du passage proprement dit, des zones de garde en briques triangulaires sur lesquelles la circulation devient, par suite, très difficile (fig. 160 et 161).

Frotteurs de prise de courant. — La prise de courant sur le troisième rail se fait par un frotteur, c'est-à-dire par une semelle en fonte ou en acier qui est suspendue sous la voiture et que cette dernière entraîne avec elle (fig. 162). Un câble souple, partant de la semelle, passe sous la caisse de la voiture et se rend à l'appareil de manœuvre des moteurs. Une voiture est toujours munie d'au moins deux frotteurs, afin que le contact soit toujours assuré, même si l'un des frotteurs ne fonctionne pas bien ou n'est plus sur le 3e rail, comme le fait peut se produire dans les croisements et les aiguillages.

S'il fallait s'en rapporter à cette seule spécification, il semble-

rait que la construction d'un frotteur pour prise de courant ne dût pas présenter de difficulté spéciale. Mais l'expérience prouve qu'un bon frotteur est, en somme, assez difficile à réaliser, et cela parce qu'il doit satisfaire à toute une série de sujétions, dont les principales sont les suivantes :

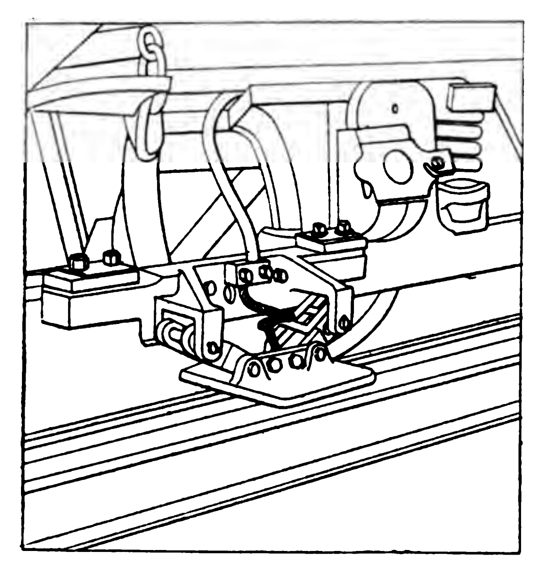


Fig. 162. — Frotteur pour prise de courant.

1° Le frotteur doit avoir un certain jeu dans le sens vertical, afin de bien s'appliquer sur le rail malgré les tressautements de la voiture et même si le troisième rail ou les rails de roulement présentent des inégalités de pose. Si le frotteur était fixé à la caisse de la voiture, il faudrait tenir compte, en outre, de l'aplatissement variable des ressorts sous la charge ; mais on s'arrange pour qu'il dépende non de la caisse, mais des essieux ou des boîtes à huile. N'empêche que, même dans cette situation, il y a lieu encore de se préoccuper de l'abaissement général de la voiture, après tournage des bandages des roues ;

2° Le poids du frotteur doit être assez considérable pour assurer un bon contact entre l'appareil et le rail, et ce, malgré les poussières et autres corps étrangers qui peuvent se déposer sur la surface du troisième rail. Ce poids sera d'autant plus considérable que le débit à écouler sera plus intense. Alors qu'un poids de 10 à 12 kilogrammes suffit pour des trains légers (de 3 à 500 ampères) il faut aller jusqu'à 30 kilogrammes pour des trains

lourds (1 000 à 1 500 ampères). Une substance quelconque, conductrice de l'électricité, bien que pesante, ne suffirait pas, d'ailleurs, pour assurer un bon contact électrique. Il faut qu'il se produise un frottement bien caractérisé entre le frotteur et le rail. Aussi le cuivre ne conviendrait-il pas. Avec la fonte et l'acier il y a une bien meilleure adhérence et il est d'autant plus désirable de la réaliser que le 3e rail n'est pas toujours très propre. Cette particularité est à redouter sur les lignes où les trains ne circulent qu'à des intervalles assez éloignés, et aussi sur celles où la traction électrique fonctionne concurremment avec la traction à vapeur. Dans ce cas, il se dépose à la surface du 3e rail une couche humide de graisse et de charbon qui est tout à fait propice à la création d'arcs très violents entre le rail et le frotteur. De la terre ou du sable déposés sur le rail ont moins d'inconvénient, parce qu'ils ne produisent pas de vapeur aptes à favoriser la création d'un arc ;

3° Si le frotteur doit exercer par son poids une pression de 10 à 30 kilogrammes sur le rail et si, d'autre part, il doit pouvoir se déplacer verticalement il devra évidemment, là où il abandonnera le 3e rail, par exemple aux croisements et aux aiguillages, retomber au-dessous de son plan de frottement. Il pendra sous la voiture, tout en étant à 5 ou 600 volts, car il communiquera par le câblage avec le second frotteur. S'il pend trop et qu'il rencontre une masse métallique quelconque, il provoquera un court circuit très violent, susceptible de mettre le feu à la voiture et de détraquer les appareils ou les machines servant à la production et à la distribution du courant.

Donc le frotteur ne doit pas descendre trop au-dessous du troisième rail et, comme celui-ci n'est souvent qu'à une dizaine de centimètres au-dessus des rails de roulement, il ne reste en somme, pour l'abaissement possible du frotteur, qu'une marge très faible ;

4° Puisqu'en des points particuliers le frotteur doit quitter le

3e rail, il faut que, peu après, il puisse reprendre contact avec lui. Nous avons vu qu'en ces points le rail était rabattu vers le sol, de manière à former plan incliné pour le frotteur. Mais si celui-ci n'était susceptible que d'un déplacement vertical, il aborderait, à ce moment, le 3e rail par sa tranche et se briserait net. Donc il doit pouvoir se placer de lui-même dans la direction du plan incliné, ce qui implique la possibilité d'un mouvement de bascule dans le sens de la voie ;

5° Le frotteur peut subir certains efforts latéraux, soit aux joints des rails, soit par suite des inégalités de surface dues aux usures, soit dans le cas de rapprochement fortuit des joues protectrices, là où le 3e rail n'est pas laissé à nu. Il convient donc, à ce point de vue, de lui donner un certain jeu dans le sens transversal ;

6° Tout en étant suspendu aux boîtes à huile, qui, elles, sont franchement à la terre par les roues, le frotteur doit en être supérieurement isolé, afin d'éviter sinon des courts circuits francs, du moins des échauffements et peut-être même l'inflammation du câblage. Mais, d'autre part, le frotteur doit être très voisin des boîtes à huile, afin que, dans les courbes, son déplacement latéral soit réduit au minimum et qu'il ne puisse pas tomber en dehors ou en dedans du 3e rail, auquel cas il serait infailliblement brisé, quand il reviendrait à l'aplomb du rail.

Ces diverses sujétions (et il y en a d'autres) montrent bien que la question des frotteurs n'est pas une de celles qui peuvent être traitées légèrement. Les exploitants feront bien, au contraire, d'apporter toute leur attention à cette partie de l'équipement des voitures et ils s'éviteront bien des ennuis en s'ingéniant d'abord à bien analyser les difficultés spéciales que peuvent présenter, à ce point de vue, les lignes dont ils ont la charge et ensuite en combinant des frotteurs pouvant y satisfaire d'une façon parfaite.

Il y a d'ailleurs, à l'heure actuelle, tant d'installations mar-

chant avec des frotteurs et un 3e rail qu'il est permis de considérer le problème comme un de ceux que l'on pourra toujours résoudre avec un peu de clairvoyance et de pratique.

On donne au frotteur la mobilité qui lui est nécessaire en le

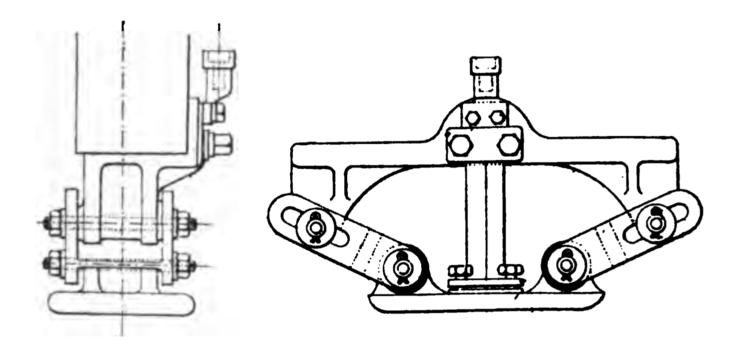


Fig. 163. — Suspension d'un frotteur par biellettes.

suspendant par deux ou quatre biellettes qui peuvent tourner d'abord autour de leurs points d'attache avec le frotteur, ensuite

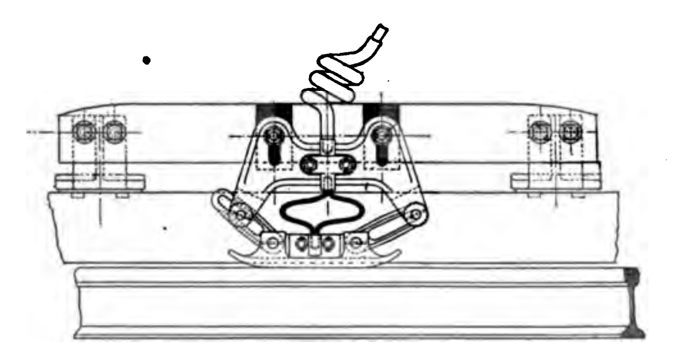


Fig. 164. — Jonction du frotteur avec les câbles allant au moteur.

autour de leurs points de suspension (fig. 162). Ces biellettes constituent ainsi une suspension par parallélogramme articulé, permettant par conséquent l'élévation ou l'abaissement du frotteur. Quant à l'aptitude de l'appareil à l'inclinaison, en vue de

l'accostage des plans inclinés du rail conducteur, on la réalise en évidant les biellettes à leur point d'articulation supérieur.

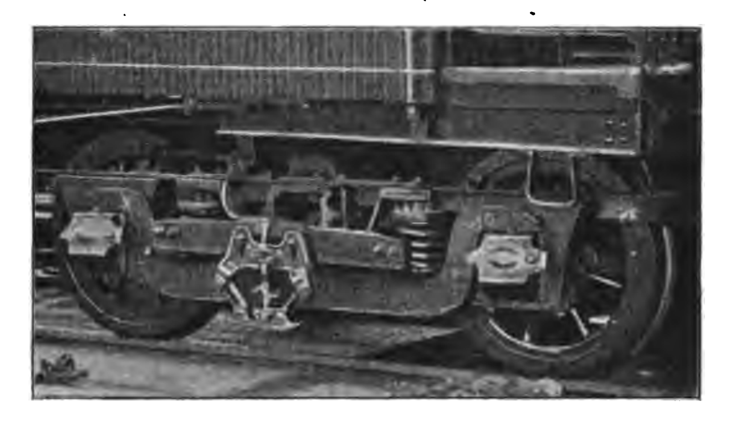


Fig. 165. — Vue d'un frotteur avec les câbles d'amenée du courant.

C'est-à-dire qu'au lieu d'être simplement taraudées suivant un



Fig. 166. — Traverse de suspension du frotteur.

cylindre concentrique à l'axe de rotation, elles ont plutôt la forme d'un étrier, embrassant cet axe. De cette façon elles peu-

vent monter ou descendre, chacune séparément, ou toutes les deux à la fois, à la demande du frotteur. Enfin le jeu latéral, bien moins important, s'obtient en laissant un petit vide entre les biellettes et les attaches des axes de rotation.



Fig. 167. — Frotteur en porte-à-faux.

Il faut bien remarquer que le frotteur sera soumis, pendant la marche des trains, à des mouvements et à des chocs très brutaux. D'autre part, quand il quittera le rail, il agira de tout son poids sur les axes. Il faut donc que la suspension soit très robuste, tout en étant suffisamment mobile. Tous les boulons susceptibles de se desserrer, par suite des chocs répétés de l'appareil, devront être soigneusement goupillés.

L'expérience prouve qu'une cause rapide de destruction des axes et des biellettes est constituée par les étincelles électriques qui jaillissent entre ces deux parties de la suspension. Or, avec un frotteur simplement suspendu par des biellettes, tout le courant des voitures devrait passer par les biellettes, puis par les axes et comme, entre ces deux pièces, il existe un jeu assez considérable, qui s'augmente d'ailleurs par l'usure, il se produirait d'abord des étincelles violentes, puis ensuite de vrais arcs. Le métal serait rapidement détruit et l'on s'exposerait à une chute de frotteur, ce qui est toujours un accident grave sur un chemin de fer électrique.

On évitera ces inconvénients très sérieux en reliant la semelle même du frotteur à la voiture par un câble flexible. A cet effet, des prises de courant, dans lesquelles ce câble viendra se fixer, seront ménagées sur la face supérieure du frotteur (fig. 163 et 164). Ces attaches et le câble lui-même devront être vérifiés très souvent, en raison des causes fréquentes de rupture, provenant des mouvements violents du frotteur.

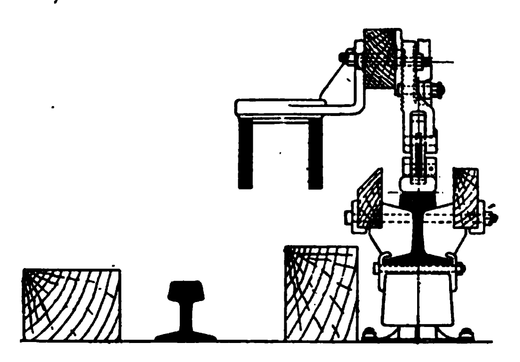


Fig. 168. Frotteur du Manhattan Railway.

Enfin une question tout aussi importante est celle de l'isolation même du frotteur. On la réalisera, d'une façon satisfaisante, avec un matériel à bogies (locomotive ou automotrice) en reliant les boîtes à huile par une traverse en bois paraffiné et en fixant le frotteur sur cette traverse (fig. 166).

On pourrait également monter ce frotteur en porte-à-faux, comme le montre la figure 167, qui concerne le frotteur de la ligne de Milan à Varèse. Mais cette disposition est moins satisfaisante que la précédente. Elle s'impose cependant dans le cas du matériel non à bogies, à moins que l'on ne puisse relier les boîtes à huile par une traverse pouvant se prêter aux déviations réciproques des essieux dans les courbes. En tout cas, le montage direct des frotteurs sur les boîtes à huile doit être évité, l'expérience montrant qu'il est alors très difficile de maintenir un isolement convenable entre la boîte à huile et le frotteur.

Le frotteur que représente la figure 168 est celui de l'Elevated de New-York. Le patin est suspendu, de chaque côté, par une seule bielle. Enfin on voit, figure 169, un frotteur étudié par la General Electric Company pour 3e rail, avec protection hori-

zontale. Ce frotteur est lui-même protégé par une semelle en bois, prenant appui sur la traverse de support, reliant les boîtes à huile des bogies.

Le frotteur du métropolitain électrique de Berlin (fig. 170) pré-





Fig. 169. — Frotteur pour 3e rail protégé

sente une disposition spéciale permettant, quand les trains entrent dans un tunnel, d'envoyer le courant dans le circuit d'éclairage

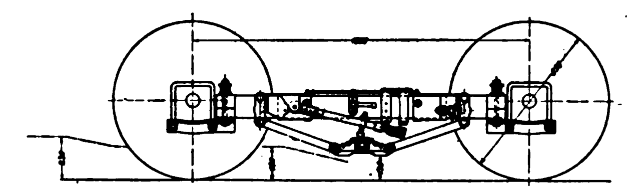


Fig. 170. — Frotteur du chemin de fer métropolitain de Berlin.

des voitures. A cet effet le frotteur est suspendu à deux grandes bielles qui facilitent son relèvement dans le sens vertical ; dans les tunnels, ce relèvement se produit naturellement par suite d'une surélévation du rail et à ce moment un contact pivotant, soulevé par le frotteur, vient appuyer sur un autre contact relié au circuit d'éclairage.

Distribution à 3 et à 5 fils. — Si la distribution se fait à 3 fils

et qu'il s'agisse d'une ligne à double voie, le 3e rail sera par exemple à + 500 volts pour l'une des voies et pour l'autre voie à — 500 volts. Il y aura donc deux 3es rails, à des potentiels différents. Entre chacun des 3es rails et les rails de roulement, la différence de potentiel sera toujours de 500 volts; mais, entre l'un et l'autre rail électrique elle atteindra 1 000 volts.

Dans ces conditions, il sera indispensable de bien isoler les 3es rails l'un par rapport à l'autre et d'éviter qu'ils ne puissent se toucher (croisements, aiguilles, etc,...). De même on devra, dans les croisements et les aiguillages, prendre des précautions pour que la jonction des 3es rails ne puisse se faire par les frotteurs des voitures.

Ces diverses sujétions donnent beaucoup moins d'intérêt au système, malgré ses avantages évidents au point de vue des pertes de charge.

Au moment de la construction du Central London, la question s'est posée de savoir si, en raison de la grande consommation de la ligne, il n'était pas avantageux de recourir à une distribution à 3 fils. Il a finalement été reconnu qu'il était préférable de prévoir une distribution par courants triphasés et commutatrices.

Cependant on trouve à Londres même une application très intéressante du système à 3 fils. C'est celle du *City and South London*. A la vérité elle est combinée avec une alimentation générale à 5 fils et, pour cette raison, nous en parlerons avec plus de détail, quand il s'agira de l'alimentation des lignes de distribution. Mais les 3es rails présentent bien, comme dans la distribution usuelle à 3 fils, une différence de potentiel de 500 volts entre eux et les rails de roulement, ce qui permet l'emploi d'isolateurs d'un type usuel.

S'il s'agissait d'une ligne à simple voie la distribution à 3 fils comporterait soit des sections successives à + 500 volts et à — 500 volts, soit deux 3es rails l'un à + 500 volts, l'autre à — 500 volts, de part et d'autre de la voie. Dans le premier cas on

retomberait sur la distribution avec 3e rail unique, mais il serait nécessaire de répartir les trains de telle façon que la charge des sections à potentiel différent soit à peu près la même. Dans le second, les voitures devraient être munies de deux frotteurs et de deux moteurs, l'un à + 500 volts, l'autre à 500 volts. L'emploi de deux 3es rails constituerait une dépense appréciable et une complication sérieuse; mais la répartition de la charge se ferait alors entre les fils, d'une façon parfaite.

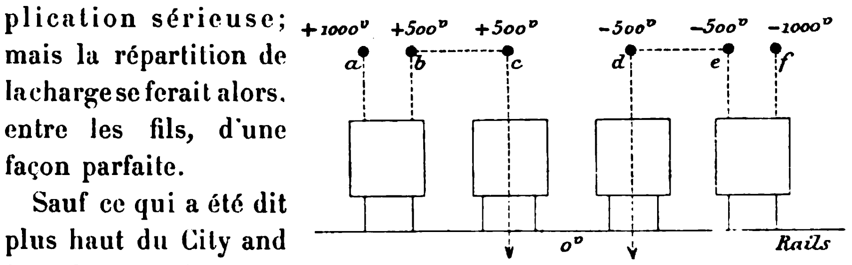


Fig. 171. — Distribution à 5 fils.

Sauf ce qui a été dit plus haut du City and South London, il n'existe pas actuellement de chemin de fer utilisant une distribution à 5 fils. Mais on pourrait appliquer le système, dans des cas spéciaux, par exemple, pour une ligne à quatre voies, en adoptant une distribution analogue à celle que représente la figure 171 et dans laquelle, pour simplifier, nous avons supposé que les conducteurs étaient aériens. Pour chaque voie la différence de potentiel entre les balais des moteurs ne serait que de 500 volts, bien que la distribution se fasse en réalité à 2 000 volts.

Distribution de l'électricité par conducteurs aériens. Courants continus. — La distribution du courant électrique par conducteurs aériens est évidemment plus simple et plus commode que par un 3e rail. Aussi devra-t-elle être employée, de préférence au 3e rail, pour toutes les lignes dont les conditions d'exploitation se rapprocheront de celles d'un tramway.

On fera usage, dans ce cas, de fils de cuivre que l'on soutiendra tous les 30 à 40 mètres par des fils transversaux ou par des poteaux-consoles.

Le fil de cuivre employé couramment sur les lignes de tramway a un diamètre de 9,2 mm., correspondant à une section de 66,2 mm². Si, par suite du débit à écouler, cette section est un peu faible, on pourra adopter un échantillon un peu plus fort 10,5 mm., ou mieux un fil en forme de huit, qui se prête bien,

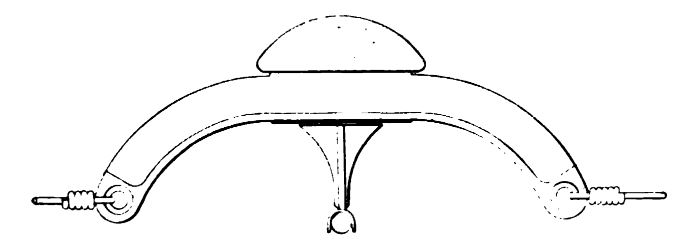


Fig. 172. — Support pour fil aérien.

d'autre part, par son évidement, à l'accrochage et dont la section atteint facilement 100 mm².

Les fils aériens sont pris dans des supports isolés (fig. 172)



Fig. 173. — Boule isolante pour fil tendeur.

munis d'oreilles sur lesquelles tirent à droite et à gauche des fils tendeurs en acier. Ces fils sont eux-mêmes fixés aux poteaux de rive par des crochets isolants ou des boules isolantes (fig. 173), en sorte que la ligne est doublement isolée. Si donc un isolateur de suspension venait à brûler ou à se briser, la ligne aérienne ne serait pas pour cela à la terre. Il faut d'ailleurs remarquer,

dans le cas où il est fait usage de poteaux en bois — et ceux-ci

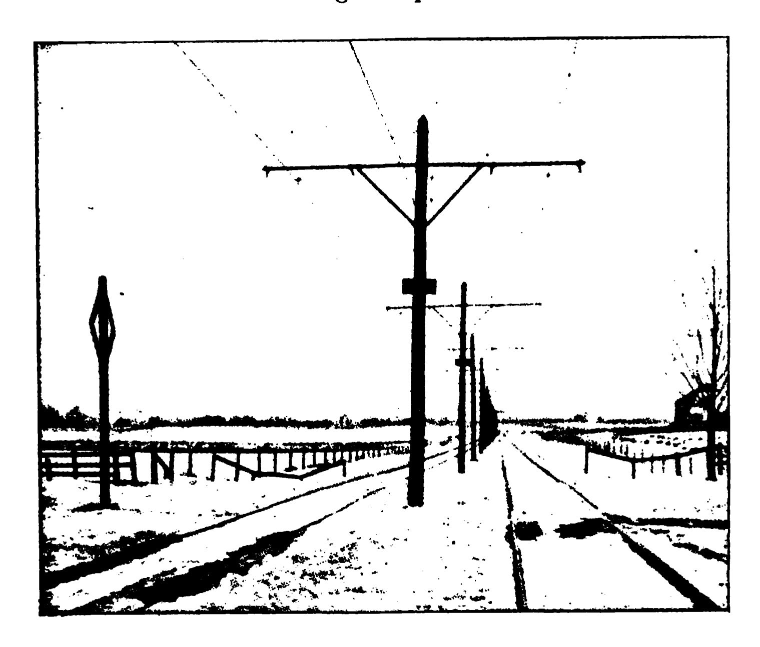


Fig. 174. — Suspension par double console.

sont très admissibles sur des lignes de chemins de fer à plate-forme indépendante et pour lesquelles la question décorative n'existe plus — que les poteaux eux-mêmes augmentent l'isolement de la ligne. Aussi peut-on, avec une ligne aérienne, assurer la distribution avec une régularité et une sûreté à peu près absolues on limitera d'autre part, tout défaut fortuit par l'installation d'*interrupteurs de section* établis, par exemple, tous les kilomètres et à l'aide de *parafoudres* (voir page 297) on empêchera la propagation, par la ligne, des décharges atmosphériques.

Sur les réseaux de tramways les conducteurs aériens sont le plus souvent supportés par des poteaux-consoles, placés sur les trottoirs, système qui a la préférence des municipalités, parce qu'il supprime les fils transversaux dont l'aspect est toujours assez cho-

quant. De telles considérations n'existent plus pour un chemin de fer. Mais il n'en résulte pas que l'on devra éliminer complètement l'emploi des poteaux-consoles. On peut, au contraire, réaliser une suspension très économique à l'aide de poteaux à double console, placés dans l'axe de la ligne, entre les deux voies (fig. 174). Pour des lignes à simple voie, la suspension par console simple (fig. 175) peut être également avantageuse, surtout si, comme dans la



Fig. 175. — Suspension par simple console.

figure 176, on se sert des poteaux pour le support des feeders. Il est d'ailleurs à remarquer que la suppression des fils tendeurs n'est pas seulement une question d'aspect, pour la ligne. En cas de déraillement de la perche du trolley, ceux-ci peuvent recevoir des chocs violents, susceptibles de les rompre et d'amener une chute du fil conducteur.

On recommande, quand il est fait usage d'une suspension par console, de monter l'isolateur de suspension non sur la console même (fig. 177 et 178), mais sur un petit fil tendeur, prenant appui en deux points de la console (fig. 179). Ce fil tendeur sera

muni de deux crochets isolants et l'on obtiendra une suspension aussi élastique et aussi sûre qu'avec des fils transversaux. Avec des isolateurs montés directement sur la console, il se produirait un choc assez fort à chaque passage du trolley.



Fig. 176. — Suspension par simple console.

La prise de courant se fera très simplement par un trolley (fig. 180 et 181) ou par un archet (fig. 182).

Le trolley, roulant sur le fil, l'use peu et s'use peu lui-même. Mais il nécessite des supports spéciaux, pour les conducteurs aériens, aux croisements et aux aiguillages.

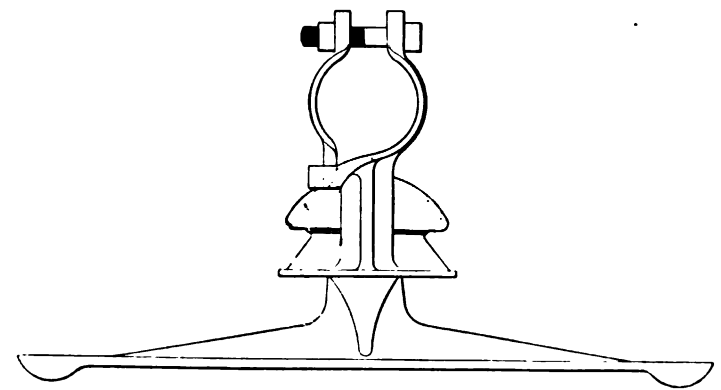


Fig. 177. — Collier de fixation sur console (vue parallèlement au fil).

Avec l'archet les croisements et aiguillages ne nécessitent pas

autre chose qu'un raccordement, fil à fil, des conducteurs aériens alimentant les deux voies, se croisant ou se réunissant. Mais, comme au frottement de roulement on subtitue un frottement de glissement, l'usure des surfaces sera plus rapide. On cherche alors à obtenir que ce soit le fil de l'archet qui s'use et non le conducteur aérien. On adopte, à cet effet, un fil d'archet en métal plus mou que le cuivre. En général, on prend de l'aluminium et, au lieu d'un fil, on se sert d'une véritable tige que l'on creuse en forme de gouttière (fig. 183). On remplit cette rainure d'une graisse très consistante, afin d'adoucir encore le frottement. Parfois on se contente d'un fil de cuivre, entouré d'une gaine de métal plus mou (fig. 184).

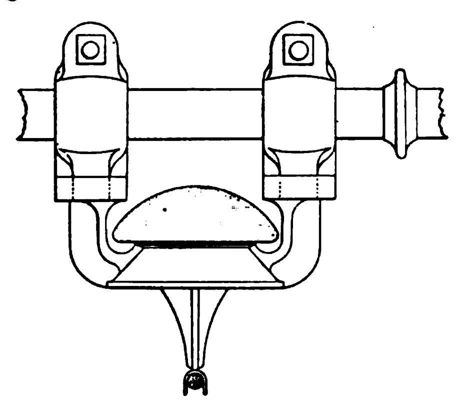


Fig. 178. — Collier de fixation sur console (vue perpendiculairement au fil).

Dans l'archet, la tige de prise de courant a facilement une

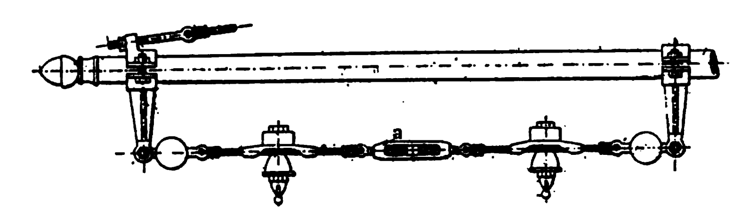


Fig. 179. — Suspension élastique à double isolement sur console.

longueur de 1,50 m. Par conséquent le conducteur aérien n'a pas besoin d'être placé exactement au-dessus de l'axe des voies. L'emploi de l'archet permettra donc, dans les courbes, de monter les conducteurs aériens, non suivant des courbes identiques, mais suivant des polygones inscrits ou circonscrits, à côtés très

allongés. Il en résultera une diminution notable du nombre des poteaux.

Toutefois, pour un chemin de fer, cet avantage sera moins

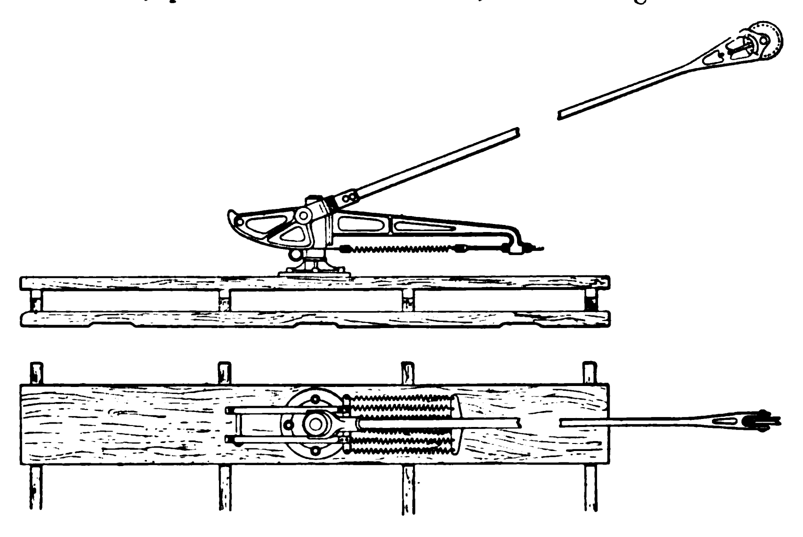


Fig. 180. — Trolley.

sensible que pour un tramway, parce que, dans ce dernier cas, les courbes sont beaucoup plus raides.

A défaut de l'archet, on pourra, pour un tracé un peu sinueux, employer le *trolley latéral* (fig. 185 et 186). Mais cet appareil conviendrait mieux pour un chemin de fer à caractère mixte, par exemple un chemin de fer d'intérêt local, qui aurait ensuite à pénétrer dans une ville par une voie de tramway.



Fig. 181. — Tête de Trolley.

Le trolley ou l'archet ont l'inconvénient de ne prendre contact avec les conducteurs aériens que par des surfaces très restreintes. Cet inconvénient, peu grave pour un tramway qui ne demande pour ses démarrages et sa marche normale qu'une intensité de

courant peu considérable, devient très sensible quand il s'agit d'alimenter un chemin de fer[1].

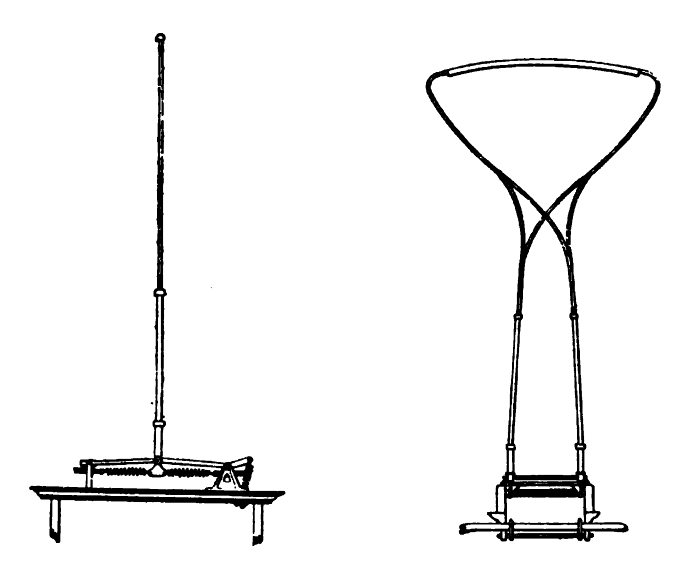


Fig. 182. — Archet.

On a donc cherché à combiner des appareils de prise de courant s'appliquant sur les conducteurs aériens suivant des surfaces plus étendues. Dans cette catégorie rentrent les trolleys à navettes et les trolleys à spatule (fig. 187). Mais ces deux systèmes ont d'autres inconvénients et, en fait, quand, par suite de l'intensité à débiter (au delà de 250 à 300 ampères), on ne peut employer ni trolley, ni archet, il faut recourir au troisième rail.

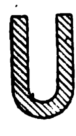


Fig. 183. — Gouttière en aluminium pour archet.

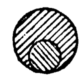


Fig. 184. — Fil avec gaine en métal mou pour archet.

Mention doit être faite, cependant, du système employé à

[1] Même si l'on prend deux trolleys, ce qui est d'ailleurs une complication non négligeable.

Baltimore. Depuis plusieurs années la C[ie] du Baltimore-Ohio

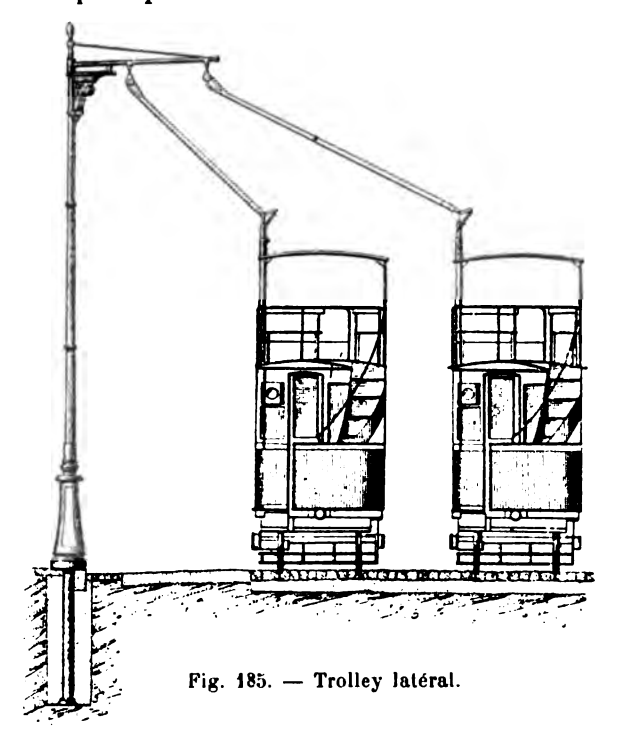


Fig. 185. — Trolley latéral.

emploie, pour remorquer ses trains de marchandises dans un tunnel de 2200 mètres établi sous la ville de Baltimore, des locomotives électriques de 87 tonnes. Ces locomotives doivent pouvoir remorquer un train de 1 700 tonnes, en sorte que l'intensité du courant, au démarrage, atteint parfois 3000 ampères. On ne pouvait évidemment songer, pour recueillir un courant pareil, à l'emploi du trolley et de conducteurs aériens analogues à ceux d'un tramway. Comme à l'époque où la trac-

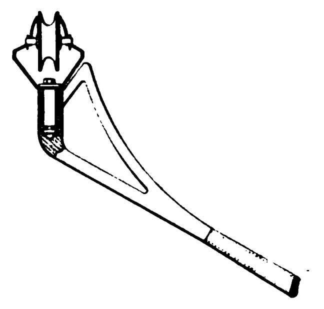


Fig. 186. — Tête de trolley latéral.

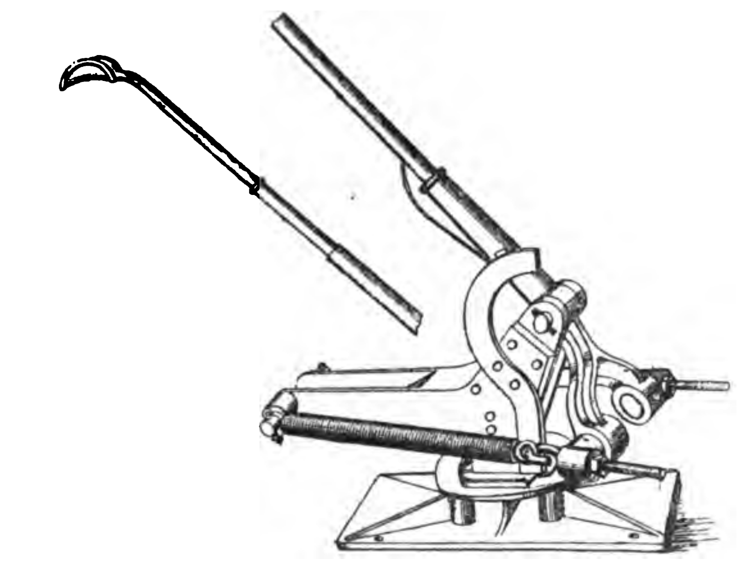


Fig. 187. — Trolley à spatule.

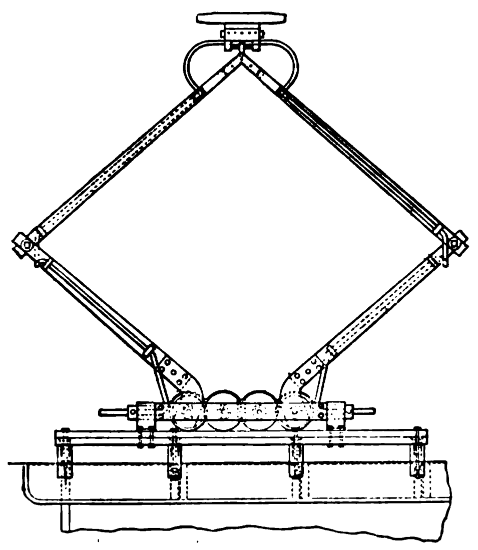


Fig. 188. — Navette, avec cadre articulé, pour prise de courant de la locomotive de Baltimore.

tion électrique a été installée on n'était pas très familiarisé avec l'emploi du troisième rail et que, d'autre part, la voie ne devait pas être trop encombrée, la traction à vapeur subsistant pour les trains de marchandises, on se décida à adopter un conducteur aérien à grosse section. Ce sont deux fers en Z, pesant ensemble 45 kilogrammes par mètre courant, et placés en regard

l'un de l'autre. Ils forment ainsi, par leurs deux branches inférieures, une sorte de canal ouvert suivant une fente longitudinale et dans lequel circule une navette, reliée par un cadre articulé à la locomotive (fig. 188).

On conçoit que la suspension de conducteurs pesant 45 kilogrammes au mètre courant doive se faire beaucoup moins facile-

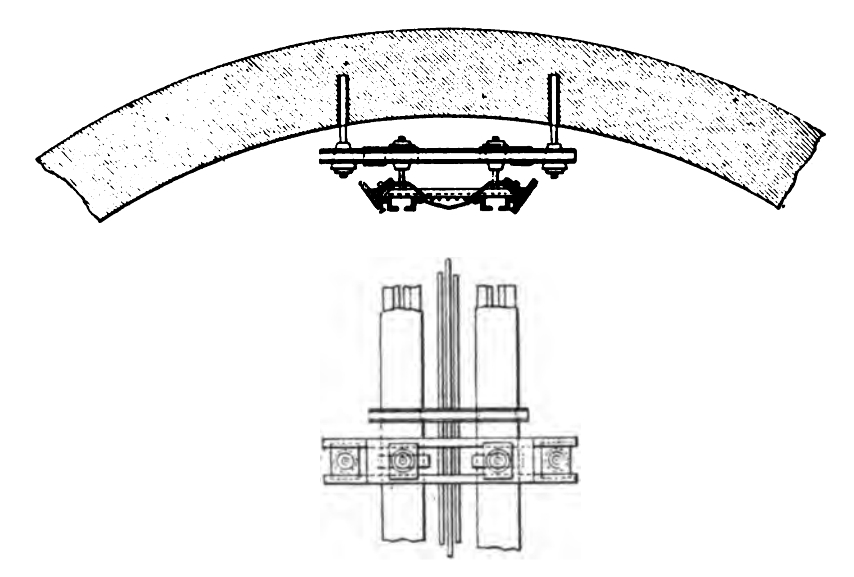


Fig. 189. — Mode de suspension des conducteurs aériens dans le tunnel de Baltimore.

ment que celle d'un fil de cuivre qui ne pèse que 7 à 800 grammes. On a réalisé cette suspension de la façon suivante. Dans la voûte du tunnel, tous les 4,50 m. et symétriquement par rapport à l'axe on a scellé deux isolateurs coniques en porcelaine, auxquelles on a suspendu une traverse métallique formée de deux fers U, réunis par des cales (fig. 189). Sur les mêmes fers U s'appuient deux isolateurs en porcelaine, munis de tiges descendantes qui se dédoublent, formant un gros crochet qui vient prendre les fers en Z par leur aile supérieure. On dispose donc ainsi d'un double

isolement, dont le résultat est de limiter les pertes de courant dans le tunnel, malgré l'humidité et malgré la vapeur produite



Fig. 190. — Conducteurs aériens en dehors du tunnel.

par les trains à voyageurs pour lesquels la traction n'a pas été modifiée, à un maximum de 5 ampères. Il est à remarquer que les

conducteurs aériens sont désaxés par rapport aux voies; mais le cadre articulé que soutient la navette peut se déplacer dans tous les sens.

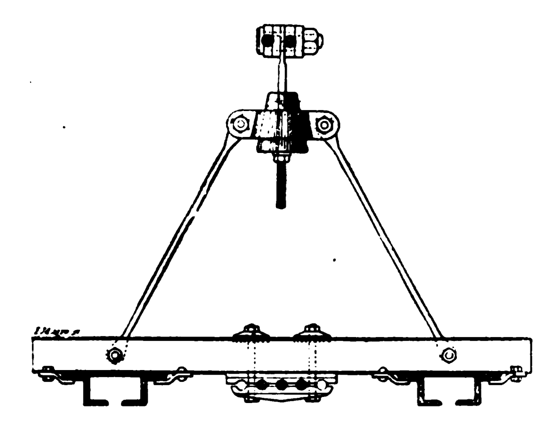


Fig. 191. — Mode de suspension des conducteurs aériens en dehors du tunnel.

Hors du tunnel, le procédé qui vient d'être décrit pour la suspension des conducteurs ne peut plus être employé. On a eu recours, en raison du poids à supporter, à de vraies charpentes métalliques constituées par des poutres à treillis, établies en travers



Fig. 192. — Locomotive de Baltimore. Mode de captation du courant sur les conducteurs aériens.

de la voie, tous les 45 mètres (fig. 190) et desquelles partent deux

câbles analogues à des câbles de pont suspendu. C'est sur ces câbles que les isolateurs, qui sont munis d'une tige de longueur variable, viennent prendre appui (fig. 191). Ces isolateurs sont

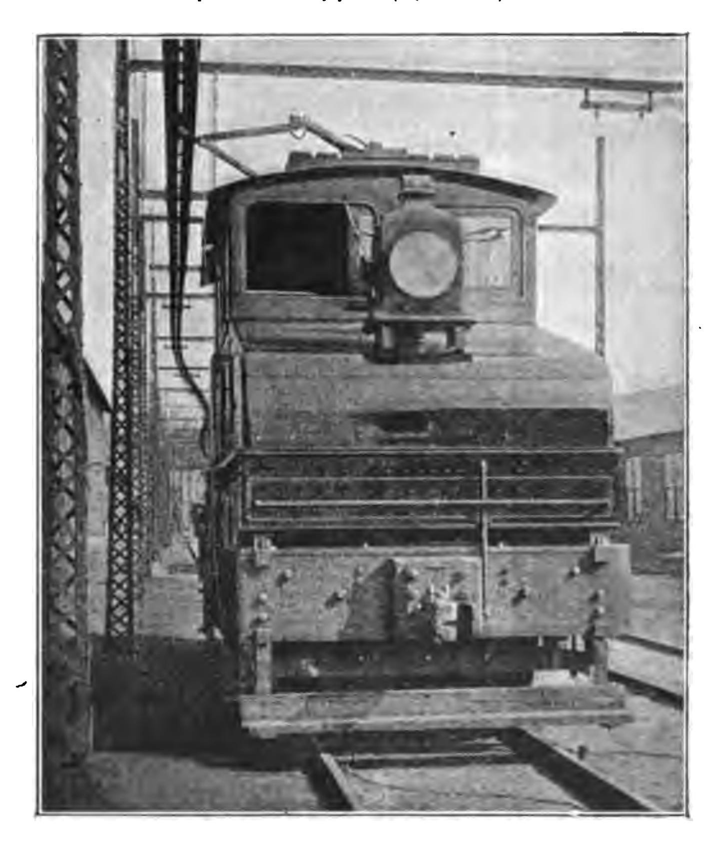


Fig. 193. — Locomotive de Baltimore. Prise de courant dans le cas des conducteurs latéraux.

pris dans un collier auquel sont suspendues, par deux tiges en fer, des traverses métalliques soutenant les isolateurs. L'espacement des isolateurs est de 4,50 m. La prise de courant se fait, comme dans le souterain, par une navette (fig. 192).

En certains points il a fallu reporter la suspension tout à fait

sur le côté des voies. Mais, grâce aux articulations du trolley, la prise de courant se fait, même dans ce cas spécial, sans aucune difficulté (fig. 193).

Il n'empêche que toutes ces dispositions sont extrêmement compliquées et coûteuses. L'installation serait à refaire que, certainement, on substituerait à la traction par conducteurs aériens la traction par troisième rail[1].

Distribution à 3 et à 5 fils. — Nous avons déjà indiqué le principe même de telles distributions. L'emploi de conducteurs aériens n'est pas un obstacle à l'application du système ; toutefois la distribution à 5 fils n'a qu'un intérêt purement théorique, à moins qu'on ne la conçoive comme celle dont il a été fait mention, à propos du City and South London.

Le chemin de fer de Grenoble à Chapareillan nous donne un exemple intéressant d'une distribution à 3 fils. La ligne étant à simple voie, deux conducteurs l'un à + 500 volts et l'autre à — 500 volts courent le long de la ligne. Les voitures sont munies de 2 moteurs (un pour chaque conducteur) et de deux trolleys. Les rails constituent le 3e fil, c'est-à-dire le fil neutre.

Les conducteurs aériens étant à des potentiels différents doivent être isolés l'un par rapport à l'autre dans les croisements et les aiguillages. Il suffit de les interrompre en ces points spéciaux, ce qui prive de courant l'un des moteurs. Mais pendant cet instant très court, l'autre moteur est en charge et suffit pour assurer le mouvement des trains. Ces croisements et ces aiguillages isolés

[1] Le président du Baltimore-Ohio est lui-même de cet avis et il en a fait la déclaration fort nette aux ingénieurs que la Cie d'Orléans a envoyé en Amérique, pour y étudier les divers systèmes de traction électrique en usage. Cette mission composée de MM. Solacroup, Sabouret, Valton, de Fréminville, Hiberty, a émis à propos des conducteurs aériens de Baltimore les considérations suivantes : « Le conducteur supérieur est fort coûteux d'installation ; il est déjà d'un entretien assez onéreux et le deviendra bien plus encore quand il commencera à s'user. La transmission par troisième rail a l'avantage de donner de moindres dépenses d'établissement. D'autre part un conducteur en rails est plus facile à entretenir, et la prise de courant par l'appareil frotteur de la locomotive est plus régulière ».

sont évidemment une petite complication ; mais l'inconvénient



Fig. 194. — Ligne de Grenoble à Chapareillan. Distribution à trois fils.



Fig. 195. — Ligne de Grenoble à Chapareillan. Aiguillage.

est moindre avec une ligne aérienne que dans le cas du 3e rail.

Nous verrons plus loin que l'on peut assurer des distributions avec des courants triphasés, 3 000 volts, comportant, par conséquent, 2 fils présentant une telle différence de potentiel. On peut donc considérer, comme relativement simple, une distribution à 3 fils pour laquelle les différences de potentiel ne dépassent pas 2 fois 500 volts, c'est-à-dire 1 000 volts. Les figures 194 et 195 montrent les dispositions qui ont été adoptées sur la ligne de Chapareillan, notamment pour un aiguillage. De part et d'autre des sections isolées, la jonction des conducteurs se fait par des fils de cuivre formant fer à cheval.

Courants alternatifs monophasés ou triphasés. — Supposons qu'il s'agisse d'abord d'une distribution à basse tension et courant alternatif simple. Dans ce cas, au point de vue du matériel à employer, la ligne pourra être considérée comme une ligne à basse tension et à courant continu.

Mais il faut remarquer que, jusqu'à ce moment, on n'a pas employé pratiquement les courants monophasés à basse tension pour la traction des chemins de fer, les moteurs à courants alternatifs monophasés ne demeurant pas généralement sous charge.

Les seules applications de la basse tension qui aient été faites l'ont été avec des courants triphasés, exigeant par suite, pour leur distribution, trois conducteurs isolés les uns des autres. En prenant les rails pour l'un d'eux, il ne reste plus à monter au-dessus des voies que deux conducteurs et l'on retombe dans le cas d'une distribution à trois fils avec voie unique. Les croisements et les aiguillages devront être isolés.

Courants triphasés à basse tension. (Thoune à Burgdorf). — Une distribution de cette nature a été adoptée pour la ligne de Thoune à Burgdorf (Suisse). La ligne, qui est à voie normale et à gabarit normal, a une longueur de 40 kilomètres. L'emploi de l'électricité s'est trouvé grandement facilité, dans ce cas spécial,

par son bas prix de revient, la compagnie exploitante ayant pu passer avec une société locale (la société Motor) un contrat pour la fourniture du courant nécessaire à la ligne, à raison de 6 centimes le kilowatt-heure, ce prix pouvant même, pour une consommation importante, s'abaisser à 5 centimes. Mais, comme la société Motor ne fournissait que du courant triphasé à haute tension (16 000 volts) on eut à déterminer si ce courant ne devait pas être transformé en courant continu par des commutatrices, ou s'il n'était pas préférable d'abaisser seulement sa tension par des transformateurs statiques. MM. Brown et Boveri, qui venaient d'installer avec succès le tramway à courants triphasés de Lugano, obtinrent que cette dernière solution fut adoptée, faisant remarquer :

1° Que les moteurs à courants triphasés pouvaient démarrer aussi bien que des moteurs à courants continus et que le réglage de la vitesse était tout aussi facile, n'exigeant que l'insertion de résistances sur le circuit d'alimentation ;

2° Que des moteurs à courants triphasés offraient même, dans le cas actuel, une facilité de conduite appréciable, permettant, malgré les grandes variations du profil en long, de réaliser une vitesse constante, aussi bien dans les pentes que dans les rampes ;

3° Que pour une ligne d'importance somme toute médiocre et pour laquelle il y avait un intérêt de premier ordre à réduire les frais d'exploitation, la transformation par transformateurs statiques (qui peuvent être laissés à peu près sans surveillance), était plus économique que la transformation par commutatrices, laquelle eut exigé, le long de la ligne, toute une série de petites usines de tranformation.

Il est vrai que la distribution par courants triphasés exigeait deux conducteurs ; mais l'exemple de Lugano prouvait que l'on pouvait installer cette double distribution sans difficulté et que, d'autre part, la prise de courant, quoique plus compliquée que dans le cas du courant continu, se faisait encore d'une façon suffisamment simple par l'emploi d'un double trolley ou d'un double archet.

Pour se rapprocher le plus possible de la distribution de Lugano on avait d'abord admis une tension de distribution de 500 volts (entre les conducteurs et les rails). Mais, afin de pouvoir augmenter le tonnage et la vitesse des trains, on adopta définitivement une tension de 750 volts, tension qui, bien que dépassant notablement celles admises jusque-là pour la distribution des courants alternatifs, fut autorisée par le gouvernement fédéral.

En laissant de côté, provisoirement, tout ce qui touche le trans-

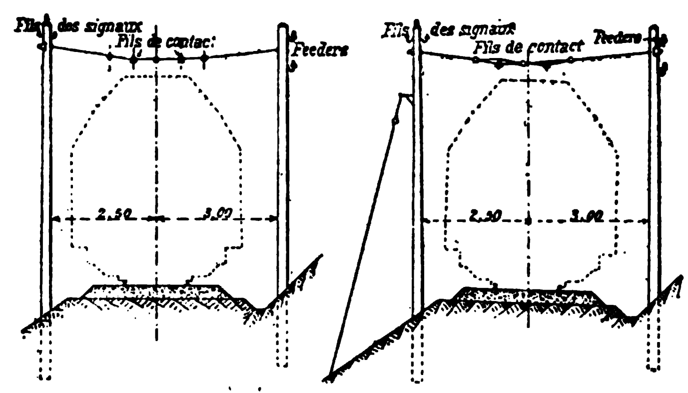


Fig. 196. — Chemin de fer à courants triphasés de Thoune à Burgdorf. Suspension des conducteurs aériens : en alignement droit et dans les courbes.

port de force et la transformation de courant on voit donc, finalement, que le chemin de fer de Thoune à Burgdorf réalise une très importante application de l'utilisation directe du courant triphasé à une tension que l'on peut encore ranger parmi les basses tensions.

La double ligne aérienne est constituée par 2 fils de cuivre de 8 millimètres de diamètre, tendus au-dessus des voies à une hauteur variant de 5,20 m. à 4,85 m. La flèche maxima n'est donc que de 0,35 m. La suspension se fait par fils transversaux en acier, de 6 millimètres de diamètre, reliés par des tendeurs à des poteaux en bois espacés dans le sens transversal de 6 mètres et dans le sens longitudinal de 35 mètres. Les conducteurs élec-

triques sont suspendus aux fils transversaux par des isolateurs,

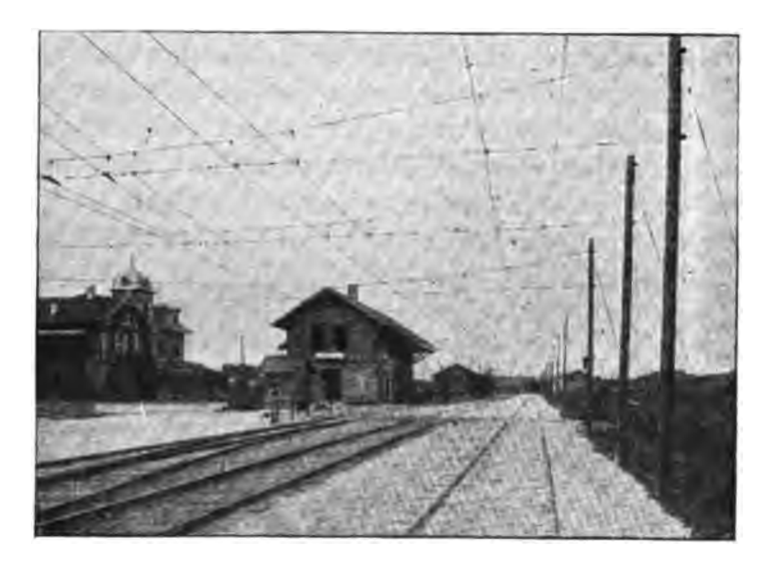


Fig. 197. — Conducteurs aériens dans une gare.

comme dans le cas d'une ligne à courant continu (fig. 196) Un

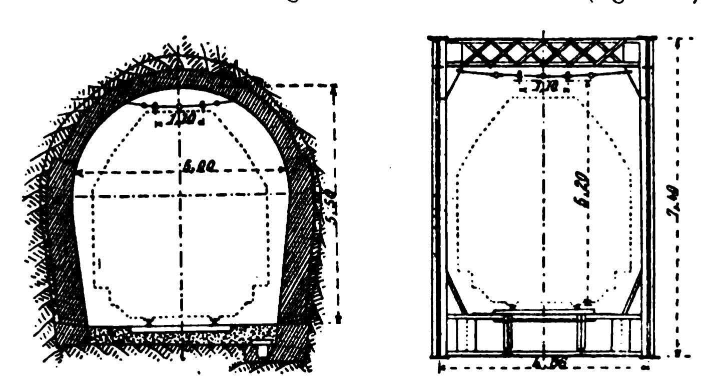


Fig. 198. — Suspension des conducteurs aériens dans les tunnels et sur les viaducs.

isolement supplémentaire est obtenu sur les fils transversaux

eux-mêmes, par des crochets isolants, placés de part et d'autre des isolateurs de suspension. Pour empêcher le déversement des isolateurs dans les courbes, on a réuni le sommet de ceux-ci aux fils tendeurs par un fil supplémentaire, en acier, isolé à ses deux points d'attache.

Dans les gares on a réalisé une suspension intéressante (fig. 197) en soutenant les fils conducteurs par un câble auxiliaire en acier, qui va d'un bord à l'autre de la voie et qui a permis d'éviter l'emploi de poteaux intermédiaires.

Dans les tunnels et sur les viaducs (fig. 198) les fils transversaux sont simplement fixés à des crochets scellés dans la maçonnerie de la voûte, dans le cas du tunnel, ou fixés aux poutres de l'ouvrage, dans le cas des viaducs.

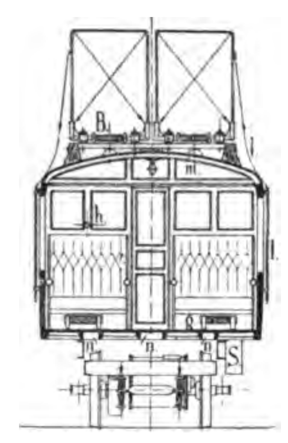


Fig. 199. — Chemin de fer à courants triphasés de Thoune à Burgdorf. Prise de courant par archet (coupe transversale).

La prise de courant se fait par quatre archets, savoir : deux à l'avant (de la locomotive ou de l'automotrice) et deux à l'arrière (fig. 199 et 199 *bis*). Ces derniers servent pour le passage des aiguilles, comme il sera expliqué plus loin.

A l'avant et à l'arrière, les archets sont montés sur le même arbre perpendiculaire à la voie et sont isolés l'un par rapport à l'autre, puisque les conducteurs sur lesquels ils doivent frotter sont de polarité différente. Il sont constitués par un cadre rectangulaire en tubes d'acier, raidi par des diagonales en fil d'acier. La partie frottante est en laiton; elle a une section triangulaire, avec arêtes légèrement aplaties. Un dispositif permet de mettre successivement chacune des faces du tube en contact avec le conducteur [1]. La pression du tube sur le con-

[1] Ces tubes de contact peuvent parcourir environ 4 000 kilomètres, avant d'être remplacés.



Fig. 199 *bis*. — Chemin de fer à courants triphasés de Thoune à Burgdorf. Prise de courant par archet (vue générale).

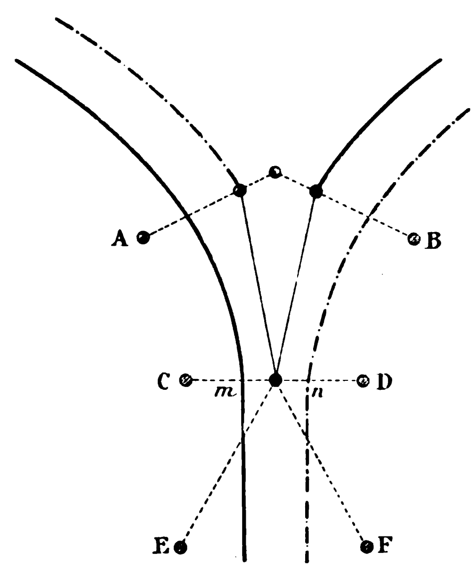


Fig. 200. — Aiguillage. Disposition schématique.

ducteur est obtenue à l'aide d'un ressort en spirale enroulé sur la base de l'archet. Ce ressort agit aussi bien pour la marche avant, que pour la marche arrière. Quand on change le sens de la marche, l'archet, qui se trouve normalement incliné vers l'arrière, se relève et passe de lui-même de l'autre côté, pour prendre une position symétrique de celle qu'il avait pour la marche avant. C'est là un

avantage sérieux en faveur de l'archet. Avec un trolley il faudrait, dans un cas analogue, faire effectuer à la main, à cet appareil, une rotation de 180 degrés.

Grâce aux archets d'avant et d'arrière, on a pu simplifier notablement la disposition des aiguillages. En ces points il suffit de remplacer les conducteurs intérieurs, sur une certaine longueur,



Fig. 201. — Chemin de fer de Thoune à Burgdorf. Vue d'un aiguillage.

par deux conducteurs isolés, sans courant, par exemple entre les poteaux A,B d'une part et C,D d'autre part (fig. 200). Si la distance entre AB et CD est inférieure ou au plus égale à celle d'écartement des archets dans le sens longitudinal et si, d'autre part, la largeur *mn* est telle que les archets puissent frotter en *m* et en *n*, deux conditions auxquelles il est facile de satisfaire, on aura toujours un archet en contact avec deux conducteurs ; l'autre ne

touchera qu'à l'un d'eux et par conséquent pendant quelques moments il y aura deux archets sur l'une des phases, un troisième sur l'autre phase et le quatrième sur un fil neutre isolé, mais qui prendra alors le potentiel de la deuxième phase. L'alimentation électrique sera donc parfaitement assurée.

L'expérience a prouvé que le passage de tels aiguillages se faisait sans étincelles sensibles et avec sécurité.

Bien entendu les fils tendeurs accrochés, dans le prolongement des fils neutres, aux poteaux E et F, devront être fixés à une hauteur telle qu'ils passent au-dessus des conducteurs électriques qu'ils ont à croiser pour atteindre ces poteaux (fig. 201).

Courants alternatifs simples à haute tension. — Les distributions de courant alternatif à haute tension sont jusqu'ici très peu nombreuses, mais elles paraissent avoir devant elles un avenir des plus brillants. Nous verrons plus loin qu'un chemin de fer à courants triphasés à haute tension (3 000 volts) est en plein fonctionnement sur les bords du lac de Côme (Italie). L'emploi d'un tel système, de préférence aux courants monophasés, s'est trouvé légitimé par les multiples qualités, au point de vue de la traction, des moteurs à courants triphasés. Mais la distribution doit comporter au moins deux fils à des potentiels très différents, ce qui peut être une cause d'encombrement et complique, en tout cas, assez notablement, les croisements et les aiguillages.

Il est clair qu'une distribution par courants monophasés, laquelle n'exigerait qu'un fil de distribution, serait beaucoup plus simple. Aussi est-il bien compréhensible que, dans ces dernières années, les efforts des constructeurs et des inventeurs se soient portés, d'une façon spéciale, sur l'adaptation de cette catégorie de courants à la traction.

a) *Système Œrlikon.* — Un premier système, proposé par les ateliers d'Œrlikon, utilise bien une distribution à 15 000 volts.

Mais le courant est transformé dans l'automotrice ou la locomotive en courant continu à 700 volts et, sous cette forme, il agit sur des moteurs-série absolument identiques à ceux qui servent dans le cas d'une distribution directe à courants continus. Le convertisseur de courant alternatif en courant continu consiste en un moteur à courant alternatif 15 000 volts, actionnant une génératrice à courants continus. En agissant sur l'excitation de cette génératrice on peut faire varier dans de grandes limites le voltage du courant produit, ce qui permet d'agir sur les moteurs à courant continu du train, sans rhéostats. C'est un avantage précieux, étant donné que, dans la traction par courant continu, le réglage de la vitesse se fait toujours par pertes rhéostatiques. Elles sont ici complètement supprimées et compensent la perte d'énergie occasionnée par le convertisseur.

Le courant alternatif à 1 500 volts est distribué par un fil de 8 millimètres de diamètre placé sur le côté de la voie et que soutiennent par-dessous des isolateurs. Avec une telle disposition les procédés ordinaires de prise de courant (trolley ou archet) que nous avons étudiés jusqu'ici ne peuvent convenir. Aussi a-t-on combiné une prise spéciale de courant par « verge de contact ». C'est une tige métallique située dans un plan perpendiculaire aux voies et par conséquent au fil de distribution et qui peut tourner autour d'un axe parallèle aux voies. Elle est courbe, sa convexité étant tournée vers le fil. Dans ces conditions elle peut s'appuyer constamment sur le fil, bien que la hauteur de celui-ci au-dessus du sol varie, en raison de la flèche qu'il prend entre deux isolateurs consécutifs de suspension ou par suite de son passage dans un tunnel.

Afin de diminuer les pertes dues à l'induction dans le circuit de retour (rails) on a adopté une fréquence très basse (16 périodes), Malgré cela la résistance de la voie se trouve encore triplée ; mais l'adoption d'une très haute tension, qui a pour conséquence un faible ampérage, compense largement cette augmentation de

résistance[1]. En supposant une ligne de 120 kilomètres de longueur avec usine à 16 000 volts au milieu et deux trains de 250 tonnes en marche sur chaque section de 20 kilomètres, soit 12 trains pour la ligne entière, on a calculé que les pertes seraient les suivantes[2] :

DISTANCES en kilomètres.	PERTES DANS LES CONDUCTEURS				PERTES DANS LES RAILS			
					VOIE SIMPLE		VOIE DOUBLE	
	Nombre de fils.	Kilowatts perdus.	Volts perdus.	Ampères	Kilowatts.	Volts.	Kilowatts.	Volts.
0 à 20	6	81	300	270	73	270	37	135
20 à 40	4	54	300	180	32	180	16	90
40 à 60	2	27	300	90	8	90	4	45

La perte totale s'établit ainsi à 6 p. 100 de l'énergie fournie par l'usine et la chute de tension est inférieure à 10 p. 100 de la tension de distribution. On est donc plutôt au-dessous des pertes admises couramment pour les distributions à courant continu.

b) *Système Westinghouse*. — La C[ie] Westinghouse a envisagé autrement le problème de l'utilisation directe des courants alternatifs monophasés à haute tension. Les moteurs de ses voitures utilisent directement le courant alternatif tel qu'il vient de la ligne de distribution. Mais, à la vérité, celle-ci n'est qu'à 1 000 volts, tension suffisamment élevée, cependant, pour pouvoir être considérée comme rentrant dans la catégorie des hautes tensions.

Le système extrêmement ingénieux de la Westinghouse Company a été appliqué à une ligne de 76 kilomètres de longueur,

[1] La locomotive des ateliers d'Œrlikon pèse 44 tonnes et peut remorquer un poids de 250 tonnes sur une rampe de 1 p. 100 à la vitesse de 40 kilomètres à l'heure. La puissance est de 575 chevaux aux jantes. Le rendement est pour la locomotive seule de 75 p. 100. Le débit est de 45 ampères seulement (avec cos $\varphi = 0,90$).

[2] *Elektrotechnische Zeitschrift* (avril 1902).

reliant Washington, Baltimore et Annapolis. L'énergie électrique est produite à la tension de 15 000 volts, mais des stations de transformateurs statiques, réparties le long de la ligne abaissent cette tension à celle de la distribution, soit 1 000 volts. Pour des raisons analogues à celles que nous avons indiquées précédemment, en parlant du système des ateliers d'Œrlikon, le nombre de périodes du courant a été fixé à 16.

Le fait saillant de l'installation, c'est l'emploi, comme moteurs à courants alternatifs, de moteurs-série, analogues à des moteurs de chemins de fer ou de tramways[1], mais à induits lamellés[2]. Ces moteurs, au nombre de 4 par voiture, se couplent en série par deux, chacun prenant alors 500 volts. Mais le fait que l'on emploie du courant alternatif permet, pour les démarrages et les réglages de vitesse, de supprimer sur le circuit d'alimentation toute insertion de résistance. On agit seulement sur la tension que l'on fait varier par un régulateur-transformateur, évitant ainsi la plus grande partie des pertes rhéostatiques qu'occasionnent les démarrages et les réglages de vitesse dans les distributions à courant continu[3].

Nous examinerons plus loin (voir p. 325) comment cette particularité a été réalisée. Ajoutons seulement que la Compagnie fait valoir que le système pourrait également s'appliquer au cas d'un réseau à traction mixte, par exemple à courant alternatif sur certaines sections et à courant continu sur d'autres. Il suffi-

[1] On sait, en effet, que des moteurs-série à courant continu sont également des moteurs à courant alternatif puisque, dans ce cas, le courant subit, dans les inducteurs et l'induit, les mêmes variations et que les réactions produites ne changent pas, quant au sens. Elles varient seulement en intensité, pendant la durée de la période ; mais il s'établit un régime moyen qui est justement celui du moteur. La Cie Westinghouse a pu très habilement faire disparaître dans ses moteurs les étincelles qui jaillissent aux balais quand on veut transformer un moteur à courant continu en moteur à courant alternatif.

[2] Avec des induits lamellés on réduit très sensiblement les pertes par courants de Foucault.

[3] On peut en déduire qu'un tel système conviendrait bien non seulement pour une grande ligne, mais aussi pour une exploitation urbaine ou suburbaine pour laquelle la quantité d'énergie inutilement consommée pendant les démarrages avec le système série-parallèle prend une importance relative très considérable.

rait pour cela d'ajouter à l'équipement normal de la voiture ou de la locomotive un contrôleur et un jeu de résistances ohmiques.

De même si la distribution générale était faite sur un réseau par courants triphasés et que l'on voulût, sur certaines sections, avoir recours au courant alternatif monophasé, il suffirait d'opérer sur l'une des phases en divisant la section en sous-sections, marchant l'une avec l'une des phases et la suivante avec l'autre phase, afin d'équilibrer le travail sur chaque phase [1].

Courants triphasés à haute tension. — Si, considérés au point de vue spécial de la traction des chemins de fer, les courants alternatifs monophasés à haute tension n'ont guère encore franchi les limites du domaine expérimental, en revanche il a été démontré, par l'installation des lignes du lac de Côme (chemin de fer de la Valteline), que les courants triphasés à haute tension constituaient un système pouvant, dans certains cas, être comparé et même préféré à celui des courants continus.

La ligne sur laquelle cet intéressant système de traction a été appliqué, va de Lecco à Colico, d'où partent deux embranchements se dirigeant, l'un vers Chiavenna et l'autre vers Sondrio, soit une longueur totale de 106 kilomètres. L'énergie électrique est produite sous forme de courants triphasés à 20 000 volts dans une usine hydro-électrique, située à Morbegno. Elle est répartie, le long de la ligne, par 3 conducteurs de 8 millimètres de diamètre qui alimentent 10 sous-stations distantes d'environ 10 kilomètres. Ces sous-stations renferment des transformateurs statiques qui abaissent la tension à 3 000 volts et lancent le courant, sous cette tension, dans deux conducteurs de 8 millimètres de diamètre, régnant au-dessus des voies, le troisième conducteur étant constitué par les rails. La suspension des conducteurs se fait par fils transversaux, reliés par des isolateurs en porcelaine à des poteaux

[1] *Street Railway Journal*, octobre 1902.

en bois (fig. 202). Ces fils transversaux supportent eux-mêmes les conducteurs à 3 000 volts par des isolateurs en ambroïne protégés par une carapace en fonte (fig. 202 *bis*). Afin de donner aux lignes aériennes une résistance mécanique plus grande, les divers

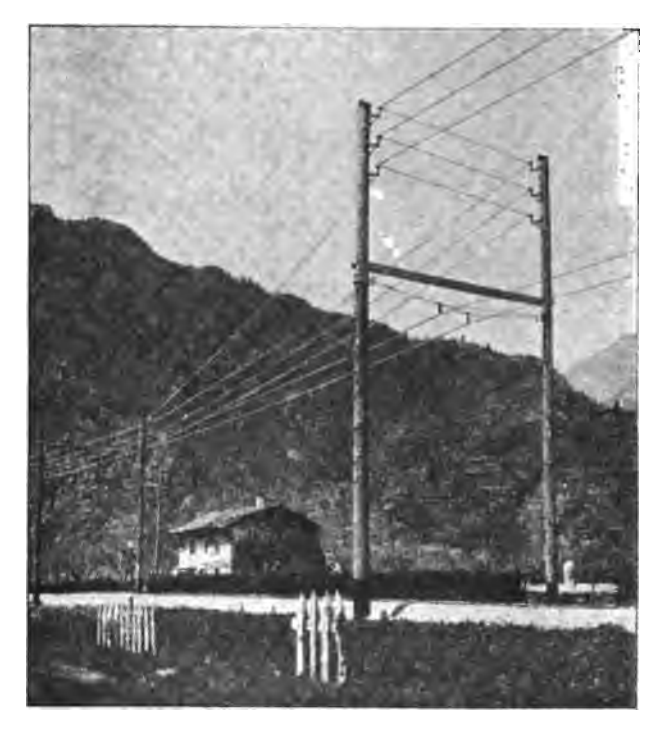


Fig. 202. — Chemin de fer à courants triphasés et haute tension de la Valteline. Suspension des conducteurs aériens.

tronçons de cette ligne n'ont pas été soudés entre eux, comme on le fait généralement pour une ligne à courant continu à basse tension. Les extrémités des conducteurs sont recourbées et passées dans une pièce spéciale isolée où elles se fixent comme à un crochet. Dans les gares, l'administration a exigé que la suspension se fît par poteaux-consoles situés sur un trottoir séparant les voies de croisement. La figure 203 représente l'ensemble des dispositions

adoptées dans ce cas spécial. De plus, un interrupteur, mis à la disposition du chef de gare, permet, tout en maintenant la continuité du circuit par deux fils contournant la gare (fig. 204), d'isoler de la ligne tous les fils suspendus au-dessus des voies, dans chaque gare. tant qu'il n'y a pas de train dans les stations.

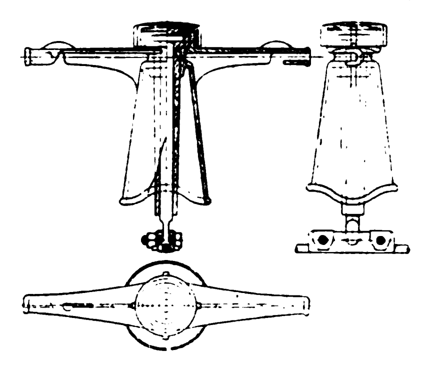


Fig. 202 *bis*. — Isolateurs pour suspension de la ligne aérienne.

On emploie, pour la traction, des automotrices ou des locomotives. Dans l'un et l'autre cas la prise de courant se fait par deux archets situés



Fig. 203. — Conducteurs aériens dans les gares.

l'un à l'avant et l'autre à l'arrière (fig. 205). Chaque archet sert à la fois pour les deux conducteurs ayant, à cet effet, sa tige supérieure divisée en deux parties isolées l'une par rapport

à l'autre. Les parties frottantes sont constituées par des rouleaux en aluminium montés sur billes ; leur longueur est de 45 centimètres et leur diamètre intérieur de 8 centimètres. A leurs extrémités, ils sont terminés par des surfaces coniques qui facilitent leur passage dans les croisements et les aiguillages. Le courant va des rouleaux aux moteurs par des câbles isolés, renfermés dans des tuyaux en fer. Il est à noter, de plus, que les deux bases de l'archet sont isolées du toit de la voiture par quatre isolateurs en porcelaine. De puissants ressorts fixés sur les bases maintiennent l'archet contre les conducteurs et lui permettent, en outre, de prendre une légère inclinaison dans le sens transversal. Ce petit perfectionnement n'existait pas, au début, et, comme les deux conducteurs aériens ne pouvaient être rigoureusement tendus à la même hauteur au-dessus du sol, il en résultait que, souvent, le contact n'était pris que par un seul rouleau.



Fig. 204. — Ligne aérienne contournant les gares.

Un dispositif, marchant par l'air comprimé, permet au wattman de rabattre l'archet sur le toit de la voiture en sorte que cet appareil constitue, entre ses mains, un véritable interrupteur à haute tension. Mais, comme les archets de même polarité sont reliés électriquement, on s'exposait, en rabattant l'archet sur le toit de

la voiture, à provoquer un court circuit. Aussi le rabattement se fait-il sur des ressorts bien isolés.

Grâce aux deux archets, le passage des aiguilles a lieu sans difficulté. En ces points les fils conducteurs sont simplement dédoublés. Mais, comme deux d'entre eux, à des potentiels différents, se croisent forcément, on remplace les fils sur 1,50 m.

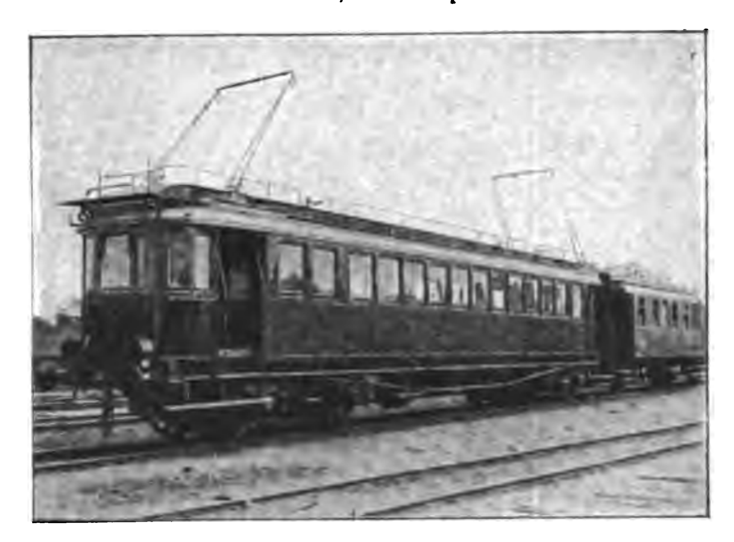


Fig. 205. — Chemin de fer à courants triphasés de la Valteline. Archets pour la prise de courant.

de part et d'autre des croisements par des tiges en bois saturé d'isolant (fig. 206). Quand l'un des archets est sur le croisement isolé, l'autre est sur deux conducteurs, soit à l'avant, soit à l'arrière, en sorte que l'alimentation des moteurs peut encore se faire par ce second archet.

Les raisons qui ont motivé l'emploi, sur les lignes de la Valteline, du courant triphasé, de préférence au courant continu, sont

[1] Avant de se lancer dans l'emploi direct de courants à tension aussi élevée, MM. Ganz et Cie avaient procédé sur une voie d'essai, à Budapest, à toute une série d'expériences qui ont montré que le problème pouvait être abordé pratiquement par eux, en toute sécurité.

les mêmes que celles qui ont été rappelées pour le cas de la ligne de Vienne à Burgdorf. Mais, en adoptant des courants à haute tension, MM. Ganz et Cie, de Budapest, ont rendu la solution encore plus intéressante. L'expérience a montré que la manipulation de courants à 3 000 volts, avec les appareils de manœuvre existant sur les voitures de la Valteline, pouvait se faire avec autant de commodité que celle de courants continus à 6 ou 700 volts. Grâce à un système spécial de groupement des moteurs, dont il sera parlé plus loin (voir p. 334), les démarrages sont réalisés avec autant d'aisance que si les moteurs étaient à courant continu. Enfin, indépendamment du maintien automatique de la vitesse dans les pentes et dans les rampes (avantage précieux pour une ligne de montagne) les constructeurs n'ont pas manqué de faire valoir la possibilité, avec leur système, de récupérer dans les pentes une partie de l'énergie consommée pour gravir les rampes.

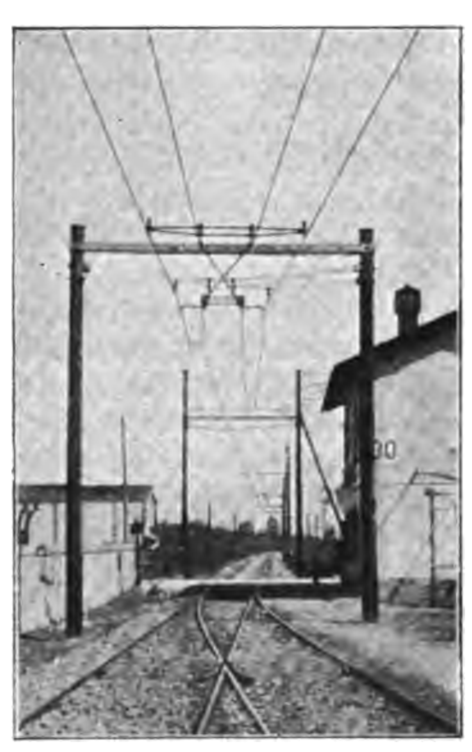


Fig. 205. — Aiguillage.

Encouragés par les résultats de leur ligne d'essai et de la Valteline, MM. Ganz et Cie n'ont pas hésité, lorsque la question s'est posée, de remplacer sur l'*Inner Circle*, à Londres, la traction à vapeur par la traction électrique, à mettre leur système en concurrence avec la distribution par courants continus et cela, bien

que les conditions d'exploitation de l'Inner Circle (qui sont celles d'un métropolitain) fussent très différentes de celles de la Valteline. Les experts anglais (MM. Preece et Parker) avaient conclu :

1° Qu'il n'y avait aucune raison pour que les propositions de MM. Ganz et C[ie] ne fussent pas adoptées;

2° Que le système avait eu la sanction d'essais pratiques et que son adoption satisferait complètement aux exigences de l'exploitation;

3° Qu'il constituait une grande avance sur tout autre système existant soit en Angleterre, soit en Amérique et qu'il facilitait considérablement l'application de la traction sur les grandes lignes.

Néanmoins la traction électrique par courants continus à basse tension fut finalement préférée. Mais il semble que les Compagnies exploitantes aient eu, avant tout, le souci de ne pas innover, considérant, comme une obligation primant toutes les autres, celle d'assurer aux énormes capitaux que nécessitait la transformation, les avantages, même s'ils devaient être moindres, d'un système éprouvé et en définitive extrêmement satisfaisant[1].

[1] Il n'est pas inutile de rappeler, en quelques mots, d'une part les raisons principales qui ont amené MM. Preece et Parker aux conclusions que nous venons de faire connaître et, d'autre part, quelques-unes des considérations qui ont fait pencher la balance en faveur du courant continu.

Si l'emploi des moteurs triphasés pour la traction ne s'est que peu répandu jusqu'ici, ont fait remarquer MM. Preece et Parker, cela tient :

1° à la nécessité de distribuer le courant par deux conducteurs aériens;

Mais cette sujétion qui a sa valeur pour une ligne de tramway, n'a que peu d'importance quand il s'agit d'un chemin de fer;

2° A ce que les moteurs triphasés, aux fréquences usuelles, ne donnaient ni un rendement assez élevé, ni un couple de démarrage suffisant.

Or les moteurs de MM. Ganz et C[ie] ont un rendement comparable à celui des moteurs à courant continu et le couple qu'ils développent est largement suffisant pour le résultat à obtenir. S'ils nécessitent des fréquences un peu basses (25 à 15 périodes), celles-ci peuvent être aussi facilement obtenues que les fréquences usuelles de 40 à 50;

3° Un avantage principal du système à courant continu est le couplage des moteurs en « série-parallèle ». Il semblait qu'un couplage analogue était impossible avec des courants triphasés et qu'il fallût, par suite, se résigner à consommer pendant les démarrages et l'accélération des intensités de courant excessives.

Mais le couplage en « cascade » appliqué par MM. Ganz fait disparaître en grande

Il est à remarquer que la tension de distribution, fixée pour les lignes de la Valteline à 3 000 volts, pourrait être encore sensiblement augmentée. MM. Ganz et C[ie] estiment qu'une distribu-

partie cette cause d'infériorité et, sur d'autres points, les moteurs à courant triphasés ont des avantages spéciaux si importants que l'on ne peut plus dire que les moteurs à courants continu leur soient supérieurs.

Il faut remarquer, en outre, que le courant à 3 000 volts n'est reçu que dans les inducteurs fixes du premier moteur. Le courant qui, sous le champ tournant produit par les inducteurs, se développe dans l'induit n'a que 300 volts et cette tension est la seule que l'on ait à manipuler pour le réglage de la vitesse. Les moteurs n'exigent aucune surveillance ; ils n'ont ni commutateur, ni balais et il ne peut, par suite, se produire d'étincelles.

Le courant peut être distribué par des fils minces et sa transformation s'effectue dans des postes qui peuvent être laissés sans surveillance et qui n'occupent qu'un faible emplacement.

Le démarrage, le réglage de la vitesse, le freinage des trains et leur arrêt se font, suivant ce système, d'une manière beaucoup plus avantageuse que suivant l'un quelconque des systèmes appliqués aux chemins de fer existants.

Grâce au couplage en cascade, on peut, pour les arrêts, réduire la vitesse à la moitié de la vitesse normale, les moteurs formant alors frein électrique et restituant de l'énergie à la ligne. Dans les rampes une récupération analogue se produit.

Voici, maintenant, quelques-unes des observations de la commission arbitrale à laquelle les conclusions de MM. Preece et Parker ont été soumises.

Il s'agit d'un chemin de fer circulaire, en tunnel, à trafic intense, parcouru par des trains à arrêts fréquents et se succédant à de faibles intervalles, avec intercalation d'un grand nombre de trains venant d'autres lignes. Il est dès lors essentiel que le service soit d'une régularité parfaite et imperturbable. Il faut en outre que les trains soient d'un maniement facile, c'est-à-dire que, sans aucune gêne pour les voyageurs ils démarrent, accélèrent, ralentissent et arrêtent rapidement. Il importe, par-dessus tout, que le système adopté ne présente aucun danger pour e public, ni pour le personnel des compagnies intéressées.

Le système à courant continu, dans lequel un courant alternatif à haute tension est d'abord transformé, puis converti en courant continu à 500 volts, et amené d'un troisième rail dans les moteurs, est bien connu et il a rempli les conditions énumérées plus haut dans une longue et rigoureuse expérience sur des chemins de fer similaires, assurant un service similaire, dans des conditions similaires, tant en Amérique qu'en Angleterre.

Le système à courant alternatif, sous la forme établie par Ganz et C[ie] supprime les convertisseurs rotatifs employés dans le système à courant continu et introduit, dans les tunnels où circulent les trains, un courant de 3 000 volts.

Il a été reconnu qu'aucun chemin de fer en exploitation n'employait en service un courant dont la tension dépasse 750 volts et qu'il n'a pas été fait d'expérience du système proposé par M. Ganz sur des chemins de fer présentant les caractères particuliers de l'Inner-Circle. Il est vrai que certains essais de cette méthode ont été effectués sur les voies de MM. Ganz et C[ie] et sur la ligne de Sondrio à Lecco (non encore ouverte au trafic). Mais les moteurs, les trolleys, le mécanisme de régulation, les conducteurs, les appareils de sécurité décrits par M. Ganz, comme devant être employés sur l'Inner Circle, diffèrent sensiblement de ceux essayés comme il a été dit ci-dessus. L'accélération maximum des moteurs a été portée de 0,038 m. à 0,114 m. par seconde et la fréquence de 15 à 25 périodes.

tion à 5 000 volts serait tout aussi sûre. Si on la combine avec une alimentation, non plus à 20 000 volts, mais à 40 et 50 000 volts, comme on peut le faire facilement aujourd'hui, on arrive à une distribution pouvant s'appliquer à des lignes extrêmement étendues. Il suffirait, par exemple, pour une ligne de 400 kilomètres, d'installer le long de cette ligne deux usines génératrices, avec des sous-stations de transformation réparties à peu près tous les 20 kilomètres. Les grandes complications du courant continu pour les distributions à longue distance se trouveraient donc complètement éliminées. En somme, on peut dire que grâce à la traction par courants triphasés directs à haute tension, on possède aujourd'hui une solution pour la transformation des grandes lignes. Il y en aura d'autres, et il est vraisemblable que, grâce aux progrès qui seront réalisés dans la construction des moteurs à courants alternatifs, on devra pouvoir, un jour, se contenter d'une distribution à un seul fil, car un fil suffit pour véhiculer une quantité énorme d'énergie et l'esprit se refuse à croire qu'étant donnée une source d'énergie électrique on ne parviendra pas à l'adpater, d'une façon simple et sûre, aux exigences diverses de la traction. Mais il est bon d'insister sur ce point, c'est que la première étape a été franchie. En sorte que le grand mouvement qui se manifeste actuellement pour l'application de l'électricité aux chemins de fer urbains et suburbains n'a maintenant plus rien qui l'empêche d'aborder le domaine des grandes lignes.

Il est donc exact de dire que le système essayé à Londres n'est pas encore sorti de la période expérimentale et que d'importantes modifications et améliorations de ce système ont été reconnues nécessaires pour l'Inner-Circle.

Une expérience de ce système pourrait se faire avec des chances de succès sur un chemin de fer moins important, où les conditions de sécurité sont moins vitales, où les pertes, s'il s'en produisait, seraient moins considérables ; mais il est impossible d'en recommander l'essai sur l'Inner-Circle.

En fait, la commission arbitrale ne s'est appuyée que sur des circonstances purement locales pour rejeter les courants triphasés.

Nous ajouterons que, depuis l'époque à laquelle cette commission a prononcé sa sentence, la ligne de Sondrio à Lecco a été ouverte à l'exploitation et que la distribution par courants triphasés paraît donner toute satisfaction à la compagnie exploitante.

CHAPITRE V

ALIMENTATION DES LIGNES DE DISTRIBUTION

Alimentation directe. Alimentation par feeders. Survolteurs et dévolteurs. Cas d'une distribution à 3 et à 5 fils. Sous-stations de transformation. Sous-stations recevant du courant continu à haute tension et produisant du courant continu à basse tension. Sous-stations recevant du courant alternatif à haute tension et produisant du courant continu à basse tension. Sous-stations recevant du courant triphasé à haute tension et produisant du courant continu à basse tension. Dispositions intérieures des sous-stations avec commutatrices. Transformateurs tournants. Transformation du courant alternatif à haute tension en courant alternatif à basse tension. Transformation du courant alternatif à très haute tension en courant alternatif à haute tension. Alimentation par double transformation. Jonction des sous-stations aux usines génératrices. Emploi des accumulateurs dans les sous-stations.

Alimentation directe. — Le mode le plus simple d'alimentation électrique d'une ligne que l'on puisse imaginer est celui qui consiste en une usine placée sur la ligne même et dont le courant se déverse directement dans la ligne. (Métropolitain de Berlin.)

Mais cette grande commodité n'est pas toujours facile à réaliser, soit que l'usine doive également alimenter d'autres lignes, soit que les terrains dont on peut disposer ne conviennent pas pour l'édification d'une usine. Nous avons vu, en particulier, combien il était utile, si l'on voulait produire le kilowatt-heure à bon compte, d'avoir de l'eau de bonne qualité en grande abondance. La question de l'apport du charbon est également des plus importantes, quoique plus facilement soluble, puisque, dans le

cas spécial où nous nous plaçons, l'usine, en raison de son contact avec une voie ferrée, pourra évidemment recevoir son charbon directement par rails.

Lorsqu'il s'agit d'une ligne un peu longue, comportant une distribution à tension élevée, on dispose d'une marge beaucoup plus grande pour assurer l'alimentation directe. Avec des tensions de 10 à 15 000 volts, en effet, un déplacement de l'usine de 4 à 5 kilomètres ne peut avoir qu'une faible influence sur le rendement total de la distribution.

On peut envisager le cas d'une usine mixte, c'est-à-dire alimentant directement la section voisine de l'usine par une distribution à basse tension et envoyant dans les sections éloignées du courant à haute tension, cette dernière devant toutefois être abaissée dans des postes de transformation, afin que la distribution se fasse sur toute la ligne, à la même tension que dans le voisinage de l'usine. Mais on complique ainsi l'installation intérieure de l'usine, pour n'obtenir qu'une amélioration de rendement souvent insignifiante par rapport à l'ensemble.

A moins de cas bien spéciaux il sera préférable d'adopter une usine avec un matériel uniforme, sauf à recourir à une transformation pour la fraction de courant qui sera utilisée par les trains dans le voisinage même de l'usine.

Alimentation par feeders. — C'est là le cas normal. Les lignes de distribution et les circuits de retour (rails) ne peuvent en effet supporter que des débits limités, en ce sens que leur résistance au passage du courant devient trop grande, dès que le débit à écouler est élevé.

Nous avons vu que si R est la résistance totale de la ligne d'aller et de retour, il se produit une perte de voltage égale à RI et une perte d'énergie égale à RI^2.

Comme, sur une ligne de chemin de fer, I est généralement très grand, les pertes RI et RI^2 deviennent rapidement très sensibles.

En ce qui concerne les pertes d'énergie, elles ont une influence d'autant plus grande, au point de vue économique, qu'elles ont lieu non pas seulement pendant quelques heures, ainsi que le fait se produit sur les réseaux d'éclairage qui ne fonctionnent à plein débit que durant 2 ou 3 heures par jour, mais pendant 15 ou 20 heures, sinon pendant la totalité de la journée.

Nous avons déjà montré qu'il faut alors venir alimenter la ligne, en des points déterminés, par des *feeders*, c'est-à-dire par des conducteurs à grosse section, qui relient directement les points d'alimentation à l'usine.

Avec une distribution par courants continus à basse tension on pourra constituer ces feeders par des rails, isolés à la manière du 3ᵉ rail. Mais on obstrue ainsi la voie. On prendra, de préférence, des conducteurs en cuivre nu ou des câbles en cuivre avec isolement et armature.

Dans le premier cas, et si la distribution se fait par conducteurs aériens on accrochera les feeders, à moins qu'ils ne soient trop lourds, aux poteaux de la ligne. Pour de petits débits, on pourra employer des fils de trolley et, pour les gros, des câbles de diamètre approprié. Dans certaines installations (Berlin) on a pris, comme feeders, des barres de cuivre que l'on a placées sur isolateurs dans un caniveau établi au milieu de la voie. On obtient ainsi des feeders moins coûteux que des câbles, puisque l'on économise le câblage; mais des barres de cuivre sont beaucoup plus incommodes à manier que des câbles. Et comme on ne les livre que par faibles longueurs, il faut confectionner un très grand nombre de joints. A la vérité, quand on ne dispose que de peu de hauteur pour installer les feeders, on a l'avantage, avec des barres que l'on place de champ, de pouvoir espacer les isolateurs, la flèche prise par les barres étant très faible. Mais alors il faut craindre le gondolement des barres sous l'action des variations de la température.

A défaut de conducteurs nus on aura recours à des conducteurs

isolés et le mieux sera, dans ce cas, de prendre comme feeders des *câbles armés et isolés*, que l'on placera dans le ballast ou dans les accotements de la voie. Il sera bon d'entourer les câbles, malgré leur double protection (armature et isolement), d'une petite couche de sable. Celle-ci intervient non seulement pour empêcher que le câble ne soit avarié par les angles des pierres, mais aussi pour éviter qu'il ne soit mis en contact direct avec certaines substances susceptibles, à la longue, de le détériorer.

Les feeders pour courants alternatifs (monophasés ou triphasés) peuvent être aussi aériens ou souterrains. Si la tension est élevée ils devront être considérés comme les lignes de transport de force dont il sera parlé plus loin.

Il y a toujours intérêt à pouvoir isoler rapidement un feeder, non seulement pour le cas où il est le siège d'une avarie, mais aussi pour avoir le moyen d'arrêter l'alimentation de telle ou telle partie de la voie. Par conséquent on reliera le feeder aux conducteurs de distribution par un fort interrupteur à main. D'autre part, à l'origine, c'est-à-dire au tableau de l'usine on placera un disjoncteur automatique, un interrupteur à main avec plomb fusible[1] et, pour savoir à chaque instant ce que le feeder débite, un ampèremètre ou un wattmètre. Le voltage à l'origine, étant celui des barres omnibus du tableau, n'aura pas besoin d'être donné par un voltmètre spécial; il sera indiqué par le voltmètre général. Mais il sera bon de connaître le voltage à l'extrémité du feeder, ce que l'on obtiendra par un fil fin, spécial, joignant l'usine à l'extrémité du feeder (*fil pilote*). Quand le feeder sera constitué par un câble armé et isolé, le fil fin sera placé dans le câble lui-même, les constructeurs fabriquant couramment des câbles ainsi constitués.

Si des *feeders d'aller* sont nécessaires pour l'alimentation de la ligne, des *feeders de retour* devront probablement aussi être ins-

[1] Avec un disjoncteur automatique, le fusible n'est pas indispensable. On a tendance à le supprimer de plus en plus dans les installations américaines.

tallés. Nous disons *probablement* parce que, dans un chemin de fer, avec retour du courant par les rails, on dispose, pour le retour, d'une section double de celle du 3e rail. Mais une considération intervient pour diminuer l'effet de cet avantage; c'est celle de la perte de charge dans les rails. Nous avons déjà indiqué que, sur un réseau de tramways, l'administration n'acceptait dans les rails qu'une perte de charge d'un volt par kilomètre et ce, dans le but d'éviter les décompositions électrolytiques que pourraient provoquer les fuites de courant. Si une règle pareille devait être appliquée à un chemin de fer, on serait amené, étant données les pertes de voltage assez sensibles que l'on admet dans le 3e rail (facilement 7 à 8 volts par kilomètre), à adjoindre aux rails de retour des feeders représentant une section d'acier trois ou quatre fois plus forte que celle des rails de retour. Mais comme les décompositions électrolytiques sont moins à craindre que sur une ligne de tramway, on pourra généralement admettre dans le retour une perte de voltage plus élevée [1].

Les feeders de retour pourraient, à la rigueur, être constitués par de vieux rails, enfouis dans le sol et formant une ligne conductrice jusqu'à l'usine; mais on trouvera généralement avantage à prendre des câbles en cuivre, soit des câbles nus, si la perte de charge admise dans le retour est faible, soit des câbles à léger isolement, si la différence de potentiel existant entre les extrémités du feeder est assez considérable. On peut constituer une canalisation suffisamment isolée pour l'objet à remplir, dans ce cas, en noyant un ou plusieurs câbles nus dans une goulotte en bois, remplie de bitume.

Le calcul des feeders (aller et retour) ainsi que la détermination de leur point de soudure avec la ligne de distribution doivent être faits avec soin. En général et étant donné que les che-

[1] L'instruction technique pour l'établissement des conducteurs d'énergie électrique (application de la loi du 25 juin 1895) prévoit que, même pour les réseaux de tramways, une perte de charge supérieure au volt kilométrique pourra, dans certains cas, être autorisée.

mins de fer pour lesquels la traction électrique a été préférée à la vapeur sont ordinairement à trafic intense, les considérations qui interviendront auront surtout comme objectif la diminution des pertes d'énergie, pertes qui sont d'autant plus sensibles que l'intensité moyenne de la ligne sera généralement très considérable. Si, dans ce cas, on admettait pour l'ensemble des circuits, une perte de charge voisine de celle qui est usuelle dans les exploitations de tramways, soit 10 à 12 p. 100 de la tension de la distribution, on arriverait à des pertes d'énergie beaucoup trop élevées. Un simple calcul montrera facilement que l'on aura intérêt à se tenir dans des limites un peu plus basses, surtout si les circonstances locales ne permettent pas d'obtenir l'électricité à un prix relativement faible. La conséquence est que, pour un chemin de fer à grand débit avec distribution électrique à basse tension, on sera amené à multiplier les feeders ou encore (dans le cas d'une alimentation de la ligne par des sous-stations de transformation) à prévoir un nombre assez considérable de ces sous-stations. C'est là un des inconvénients de la distribution par courant continu à basse tension, inconvénient beaucoup moins grave pour un tramway dont les débits sont bien plus faibles que ceux d'un chemin de fer. C'est encore une démonstration de ce fait que les tensions admises sur les lignes de tramway sont, pratiquement un peu trop faibles pour des lignes de chemin de fer.

Puisque la question se trouvera limitée sur le terrain économique on devra d'abord ne pas hésiter à employer comme rails des échantillons bien supérieurs à ceux qui seraient strictement nécessaires pour le roulement et avoir également un 3[e] rail très lourd. Cela étant, pour déterminer les emplacements et la section des feeders, on partira de cette donnée que la dépense d'installation de ces feeders (pour intérêt et amortissement) devra être au plus égale à la dépense qu'occasionnaient les pertes d'énergie qui seront ainsi supprimées.

Lorsqu'au lieu d'un chemin de fer à trafic intense on a affaire

à un chemin de fer à mouvement peu important, avec usine produisant l'électricité à bas prix, le problème est différent et se réduit à assurer le long de la ligne une répartition du potentiel telle que le fonctionnement des moteurs puisse être convenablement assuré. On pourra, dès lors, consentir une perte de voltage dépassant un peu 10 à 12 p. 100 de la tension, cette diminution de voltage n'ayant, comme inconvénient, que de réduire un peu la vitesse normale des moteurs[1]. On devra cependant vérifier que les conducteurs de distribution et les connexions électriques ne pourront pas subir, du fait du passage du courant, un échauffement excessif.

Survolteurs et dévolteurs. — Considérons un feeder d'alimentation et supposons qu'en raison de sa longueur, de sa résistance et de son débit, il occasionne par lui-même entre l'usine et son point de soudure à la ligne de distribution une perte de voltage élevée (50 à 60 volts, par exemple). Son rôle sera dès lors différent de celui qui a été précédemment envisagé, un feeder n'ayant pas seulement pour objet d'apporter un certain débit d'électricité en un point donné d'une ligne, mais aussi d'y relever la tension en écoulant cette électricité à une tension voisine de celle de l'usine.

On pourra, dans ce cas, si l'on ne veut pas diminuer la résistance du feeder, en augmentant son diamètre, arriver à un résultat analogue par l'emploi d'un *survolteur*.

Ce survolteur n'est autre qu'une dynamo, en série sur le feeder, et qui ajoute sa force électro-motrice à celle du courant passant dans le feeder. Soit, par exemple, une dynamo pouvant donner du courant à 50 à 60 volts et intercalée sur le feeder. Il est clair que la tension résultante sera celle du feeder, augmentée de 50 à

[1] L'action d'un feeder sur la répartition des tensions le long de la ligne se détermine très facilement à l'aide d'un graphique, en prenant comme axe des x la ligne parcourue par les trains et comme ordonnées les pertes de voltage correspondant à la position la plus défavorable des trains.

60 volts. Par conséquent à l'extrémité du feeder la tension sera augmentée d'autant et l'on se trouvera, au point de vue de l'alimentation, dans une situation normale.

Mais on devra, pour maintenir la dynamo en mouvement, dépenser de la force motrice. En général, on actionne la dynamo par un moteur électrique tournant à la même vitesse, les arbres étant jonctionnés par un accouplement élastique, genre Raffard ou autre. Ce moteur va donc consommer de l'électricité. Et indépendamment de l'énergie nécessaire pour augmenter de 50 à 60 volts le débit du feeder, il faudra dépenser, en plus, une certaine quantité de force motrice pour tenir compte de l'énergie absorbée intérieurement par la dynamo et le moteur, leur rendement individuel ne dépassant guère 90 p. 100. Par conséquent le *survoltage* d'un feeder ne s'obtiendra que moyennant une certaine dépense d'énergie (facilement 25 à 30 p. 100 de celle qui est véhiculée par le feeder) de sorte que ce système ne peut être réellement pratique que si le prix de l'électricité est particulièrement bas [1].

Le *dévolteur* est l'inverse du survolteur. Il s'emploie sur un feeder de retour dont la résistance serait telle qu'elle créerait entre les deux extrémités une différence de potentiel trop considérable. Si, par exemple, la perte de tension dans le feeder est de 15 volts, ce qui revient à dire que la tension à l'extrémité du feeder, et par conséquent sur les rails de retour, est de 15 volts, il y aura 15 volts de différence entre les rails et tout autre point de ces derniers relié à l'usine par un conducteur de résistance à peu près nulle. C'est ce qui arriverait, notamment, si l'usine était placée en bordure même de la ligne. Dans ces conditions, des décompositions électrolytiques seraient à craindre, en même temps que la différence de potentiel entre balais des moteurs (automotrices ou locomotives) serait diminuée. Le dévolteur créera

[1] Nous verrons un peu plus loin un exemple de survoltage combiné avec une distribution à 3 fils (chemin de fer de Grenoble à Chapareillan).

sur le feeder une tension négative, ce que l'on obtiendra en reliant ses balais négatifs au feeder et ses balais positifs aux barres du tableau.

Le dévolteur se compose, comme le survolteur, d'une dynamo actionnée par un moteur électrique. Et, comme le survolteur, il ne travaille pas pour rien, absorbant une certaine quantité d'énergie.

En somme, si les survolteurs et les dévolteurs constituent, pour certaines distributions, une solution ingénieuse et un moyen assez commode de diminuer les pertes de charges, ils ne peuvent guère être considérés que comme un palliatif, substituant le rôle d'une machine, à celui que l'on peut demander à des masses inertes de cuivre ou d'acier. Inabordables dès que le prix de l'électricité se rapproche de la normale, ils sont toujours une complication. Par conséquent ils ne pourront être adoptés que dans des cas bien spéciaux et encore faudra-t-il bien se rendre compte qu'on n'aurait pas avantage, alors, à modifier le système général de distribution.

Cas d'une distribution à 3 et à 5 fils. — Nous avons déjà fait connaître le principe de la distribution à 3 fils, système qui comporte deux lignes de distribution par exemple à + 600 volts et — 600 volts, les rails servant de retour commun et constituant le 3e fil.

L'alimentation des lignes de distribution se fera, comme dans le cas du courant continu, c'est-à-dire *directement* si la longueur du chemin de fer est faible, et *avec feeder* si les pertes de charge sont trop fortes avec l'alimentation directe.

Avec un tel système, la question du retour du courant par les rails se trouve simplifiée, puisque ceux-ci ne servent, pour ainsi dire, que de *fils d'équilibre*. En effet s'il s'agit d'une ligne à double voie, l'une des voies étant alimentée à + 600 volts et l'autre à — 600 volts, le courant consommé sur la première voie par un

train ne reviendra pas à l'usine par les rails ; il suivra seulement ceux-ci jusqu'à ce qu'il rencontre un train circulant sur l'autre voie ; il atteindra les moteurs par les roues et reviendra à l'usine par le conducteur à — 600 volts.

Avec une ligne à voie unique à deux conducteurs, la voiture sera munie de deux trolleys ou de deux frotteurs et le courant aura encore moins de chemin à parcourir dans les rails.

Aussi, avec la distribution à 3 fils, pourra-t-on, généralement,

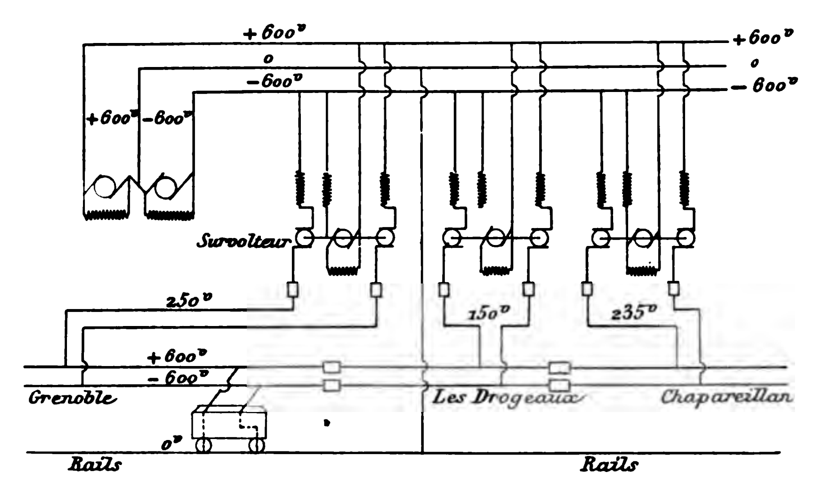


Fig. 207. — Distribution à trois fils (ligne de Grenoble à Chapareillan).

s'éviter tous feeders de retour, même si des feeders d'aller ont été reconnus nécessaires. Ces derniers véhiculant en réalité du courant à 1 000 volts, pourront avoir une zone d'action beaucoup plus étendue que dans le cas d'une distribution à 500 volts. Ils pourront, d'ailleurs, si l'on veut pousser encore plus loin la distribution, être combinés avec des groupes survolteurs.

C'est un système d'alimentation et de distribution de cette nature, qui a été appliqué sur le chemin de fer de Grenoble à Chapareillan. Ce chemin de fer, bien qu'ayant une longueur de 43 kilomètres, a pu, grâce à une distribution à 3 fils et à des sur-

volteurs, être alimenté par une usine à courant continu à basse tension. Celle-ci renferme trois groupes de 250 kilowatts, constitués chacun par une turbine utilisant une chute d'eau de 450 mètres et une dynamo accouplée directement à la turbine et donnant à la vitesse normale (325 tours par minute) 417 ampères à 600 volts. Deux de ces dynamos, montées en série, assurent la distribution à trois fils. La troisième est de réserve.

Du tableau partent trois feeders, aboutissant à Grenoble, les Drogeaux et Chapareillan (fig. 207). En raison de leur longueur ces feeders occasionneraient respectivement des pertes de voltage de 250, 150, et 235 volts. Mais des survolteurs créent dans ces feeders des forces électromotrices égales aux pertes de charge ci-dessus, en sorte que la ligne est bien à la tension des barres du tableau, soit 600 volts de différence avec les rails. Les feeders sont doubles (un pour chaque « pont »). Par groupe de feeders il y a donc deux survolteurs, c'est-à-dire un sur chaque feeder. Ces deux survolteurs, qui sont constitués par des dynamos-série, sont mis en mouvement par un moteur Compound en dérivation sur les feeders. Ce moteur Compound ayant une vitesse constante, les dynamos-série tournent à une vitesse constante. Dès lors leur tension variera proportionnellement à l'intensité du courant circulant dans le feeder. Par conséquent plus l'intensité croîtra (ce qui correspondra à une augmentation proportionnelle de la perte de charge) et plus la tension du survolteur s'élèvera. En d'autres termes le maintien du potentiel de la ligne aux valeurs de + 600 et — 600 volts se fera d'une façon automatique.

Nous avons vu qu'il existait un système de distribution à 5 fils sur le City and South London. A la vérité ce système ne ressemble en rien au système à 5 fils que l'on emploie si couramment pour une distribution d'éclairage. Dans ce dernier cas les 5 fils forment quatre « ponts » et les lampes sont réparties d'une façon aussi uniforme que possible sur chaque pont. On ne pourrait appli-

quer ce système aux chemins de fer qu'à la condition d'avoir une ligne à quatre voies avec conducteurs de distribution disposés comme on l'a indiqué, page 189.

Mais la complication serait grande et l'isolement des conducteurs aux croisements et aux aiguillages serait difficile à réaliser. D'ailleurs on ne pourrait recourir à une distribution par rails isolés, la différence de potentiel entre les rails extrêmes et la voie étant de 1 000 volts. Pour ces diverses raisons n'a-t-on pas employé,

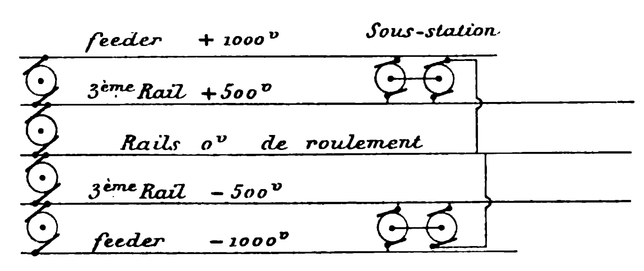


Fig. 208. — Distribution à cinq fils (City and South London).

sous cette forme, le système à 5 fils sur le City and South London. Au départ les cinq fils existent bien, mais les fils extrêmes ne servent en réalité que de feeders (fig. 208). Les autres fils forment avec la voie deux « ponts », l'un à + 500 volts, l'autre à — 500 volts réalisant ainsi une distribution à 3 fils. Quant aux fils extrêmes ils suivent la voie jusque dans des sous-stations où ils actionnent des moteurs à 500 volts, branchés d'une part sur ces fils extrêmes et d'autre part sur le 2e ou le 4e fil. Ces moteurs commandent eux-mêmes des dynamos à 500 volts dont les balais sont reliés au 2e fil et à la voie pour la gauche, au 3e fil et à la voie pour la droite. Ces dynamos alimentent directement la ligne, comme le feraient des usines marchant en parallèle avec la première.

Les deux fils extrêmes sont constitués par des câbles ; la voie sert de 3e fil; quant aux 2e et 4e fils, ce sont les 3e rails de l'une et l'autre voie.

Mais ces 3[es] rails, tout en ne présentant que la différence usuelle de 500 volts entre eux et les rails de roulement, sont l'un à + 500 volts et l'autre à — 500 volts. Donc ils ne devront jamais se rencontrer et la voiture, sous peine d'un court-circuit formidable, ne devra prendre contact par ses frotteurs avec l'un et l'autre rail. Aussi aux croisements et aux aiguillages les rails conducteurs sont-ils interrompus sur une longueur de 6 mètres, ce qui n'empêche pas, cependant, l'alimentation d'être assurée, parce que les trains comprennent une voiture motrice à l'avant et une à l'arrière et que les frotteurs d'arrière sont alors, en plein, sur les rails conducteurs.

Autrefois le City and South London n'était qu'à 2 fils et à 500 volts. Mais son prolongement vers le Nord a fait condamner ce système de distribution, qui conduisait à des pertes de charge et à des pertes d'énergie inadmissibles. Après une série d'études comparatives, les ingénieurs de la ligne ont renoncé à effectuer un transport de force par courants triphasés et ils ont trouvé plus simple et plus économique d'employer le système qui vient d'être expliqué. Ils s'en déclarent très satisfaits, accusant pour le rendement des sous-stations les chiffres suivants :

A quart de charge,	90 p. 100.
A moitié charge,	94 —
A pleine charge,	96 —
A 50 p. 100 de surcharge,	96 —

L'équilibrage des lignes se fait, d'autre part, d'une façon parfaite et la Compagnie estime que tout autre système aurait été pour elle plus coûteux et plus compliqué.

Sous-stations de transformation. — Les sous-stations de transformation sont réparties le long des lignes, assurant l'alimentation, comme le ferait une usine génératrice. Mais elles ne créent point leur électricité, la recevant de la vraie station électrique,

c'est-à-dire de l'usine centrale. Cette dernière étant combinée, dans ce cas, pour produire et transporter l'énergie électrique. même à de longues distances, dans les conditions les plus économiques, fournit aux sous-stations le courant qui convient le mieux pour cette distribution (qui est un vrai transport de force), de sorte que le courant doit subir, dans les sous-stations, avant d'être utilisé par le chemin de fer, une certaine transformation.

Nous distinguerons dans les sous-stations deux catégories : celles qui produisent du courant continu et celles qui produisent du courant alternatif.

Les premières nécessiteront toujours des appareils tournants, alors que pour distribuer du courant alternatif on peut, si la station centrale fournit du courant alternatif, effectuer toutes les transformations désirables par des transformateurs statiques. Ces dernières seront donc d'une organisation et d'une exploitation plus simples que les premières.

Sous-stations recevant du courant continu à haute tension et produisant du courant continu à basse tension. — Le courant primaire peut être du courant continu, ne différant de celui qui doit être distribué que par sa tension. Nous venons de voir, à propos du *City and South London*, comment, avec du courant à 2 000 volts, on peut assurer une distribution à 500 volts. Mais, en général, quand on prend le courant continu comme courant primaire, il y a intérêt à adopter une tension bien supérieure à 2 000 volts. Toutefois si l'on considère une tension élevée, par exemple 15 à 20 000 volts, tension usuelle en matière de transport de force, on se heurte à une double difficulté. C'est d'abord qu'il n'est pas pratique de produire par une seule dynamo du courant à une tension pareille, et ensuite que l'abaissement de la tension qui ne pourrait être fait que par un moteur actionnant une génératrice à la tension de la ligne (au plus 6 à 700 volts)

comporterait un moteur à courant continu à 15 ou 20 000 volts,

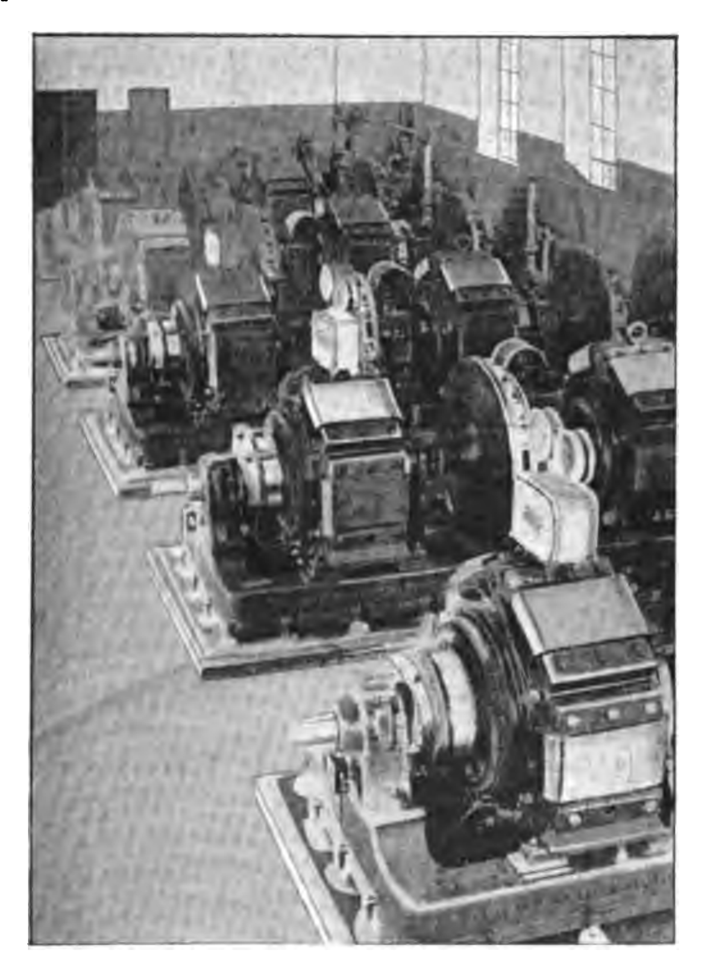


Fig. 209. — Usine avec dynamos en série.

appareil qu'il est tout aussi difficile de fabriquer qu'une dynamo à 15 ou 20 000 volts.

On tourne la difficulté par le système de la *distribution en série*, système qui ne comporte que l'intervention de dynamos usuelles

c'est-à-dire à 2 ou 3000 volts. Soit, par exemple, à produire du courant à 15 000 volts; on prendra 5 dynamos à 3000 volts que l'on montera en série et, à la sortie de la dernière, on recueillera bien du courant à 15 000 volts (fig. 209 et 210). Il s'agit maintenant de le transformer en courant continu à 6 ou 700 volts.

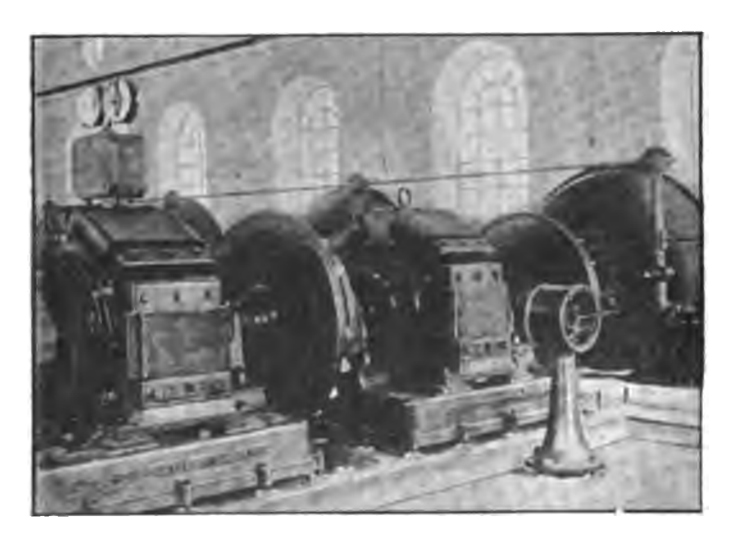


Fig. 210. — Groupe élémentaire de deux dynamos en série.

Si dans la sous-station on dispose de 5 groupes constitués chacun d'un moteur à 3 000 volts, actionnant une génératrice à 6 ou 700 volts et que d'autre part on alimente les moteurs en série, ils absorberont, à eux tous, les 15 000 volts de la ligne primaire (fig. 211) et il suffira de réunir les génératrices en parallèle, pour alimenter à 6 ou 700 volts la ligne de distribution.

Mais on voit que la sous-station de transformation présente une certaine complication, puisqu'elle renfermera 5 groupes tournants. On pourra n'avoir qu'un seul groupe par sous-station, si l'alimentation de la ligne comporte cinq sous-stations, parce que l'on alimentera les cinq stations en série, le courant

primaire les traversant successivement; en perdant 3000 volts dans chacune d'elles.

Ce système très ingénieux de distribution, spécialement étudié par M. Thury, est complété par des appareils permettant : 1° à la station centrale de régler sa tension d'après le nombre des réceptrices en service, tout en maintenant l'intensité à une valeur

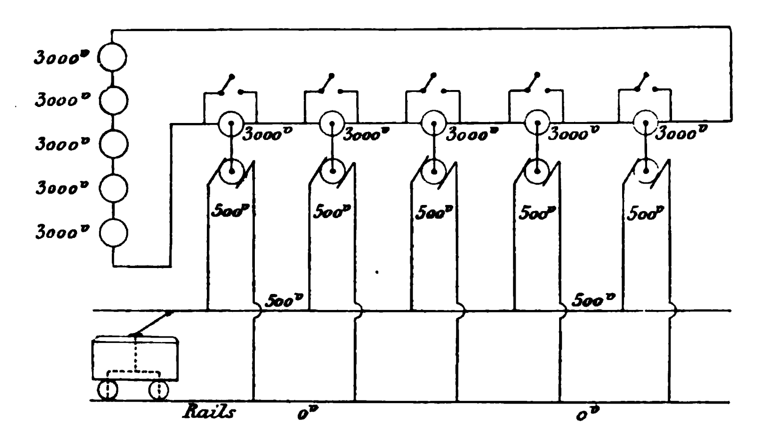


Fig. 211. — Sous-station dans le cas de la distribution en série.

constante; 2° aux sous-stations de s'isoler par un by-pass, fonctionnant à main et automatiquement, de la ligne primaire, le courant, suivant alors celle-ci, sans passer par la sous-station [1].

[1] M. Cuénod, dans une très intéressante communication à la Société Internationale des Electriciens (*Bulletin de janvier* 1900) a fait ressortir, comme il suit, les principaux avantages de la distribution en série.

Le matériel se prête à une grande uniformité, ce qui facilite les réparations.

Le fonctionnement prolongé d'installations exécutées a montré qu'on peut atteindre, avec le courant continu, d'une manière absolument industrielle jusqu'à 3 500 volts par génératrice. Il n'y a, par suite, aucune difficulté en prenant, par exemple, 20 génératrices, à atteindre 70 000 volts, c'est-à-dire un voltage permettant d'étendre la distribution, avec peu de cuivre et une faible perte, à des distances énormes.

La ligne-série peut, au besoin, avec une distribution en boucle, être constituée par un seul conducteur. Même avec deux conducteurs, on peut s'arranger pour n'avoir qu'un seul pôle sur le même support. Le nombre des conducteurs étant au plus égal à deux, on peut placer ceux-ci à des distances convenables et éviter les

La figure 212 montre un des moteurs à haute tension du système Thury. Il repose sur le sol par l'intermédiaire de supports en porcelaine. D'autre part on isole également le plancher, en sorte que les chances d'accident sont très diminuées pour le personnel. Un accident est d'ailleurs d'autant moins à craindre que le con-

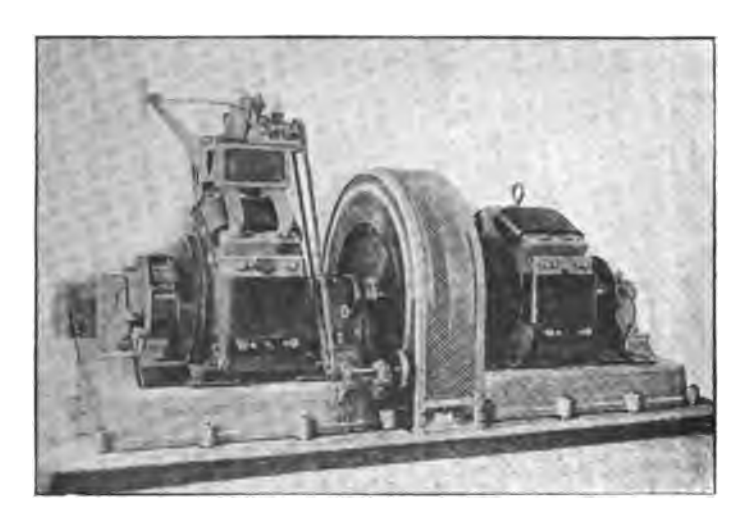


Fig. 212. — Moteur à haute tension actionnant un dynamo à basse tension.

tact avec un des fils soit d'entrée, soit de sortie ne peut occasionner de choc. Il faudrait, pour cela, que la ligne à haute tension fût mal isolée, ce qui ne peut arriver que tout à fait passagèrement. L'actionnement de la génératrice se fait par des plateaux formant volant et que relient des bagues isolantes et élastiques.

dangers de courts circuits auxquels on est exposé avec les lignes à courant alternatif pour lesquelles de nombreux conducteurs sont, au contraire, nécessaires.

Les moteurs sont de simples moteurs à courant continu excités en série et bobinés à bas ou moyen voltage, dont le rendement n'est pas altéré par leur montage en série. Le fait de leur alimentation directe par la ligne supprime la perte de la transformation.

Enfin, comme cela est nécessaire pour une génératrice de chemin de fer, on peut, par un régulateur à asservissement mécanique, maintenir la vitesse des moteurs à une valeur à peu près constante.

Il est nécessaire qu'en vue du bon fonctionnement de cette génératrice, le moteur tourne à une vitesse à peu près constante. Or, ce n'est pas là le propre des moteurs-série, qui ont tendance à ralentir sous la charge et à s'emballer, quand celle-ci diminue. Aussi a-t-on dû adjoindre au moteur un régulateur de vitesse (fig. 213 et 214). C'est assurément là une complication assez sérieuse, d'autant plus que le système de réglage adopté exige une intervention à la fois mécanique et électrique. L'appareil de réglage est constitué par une sorte de

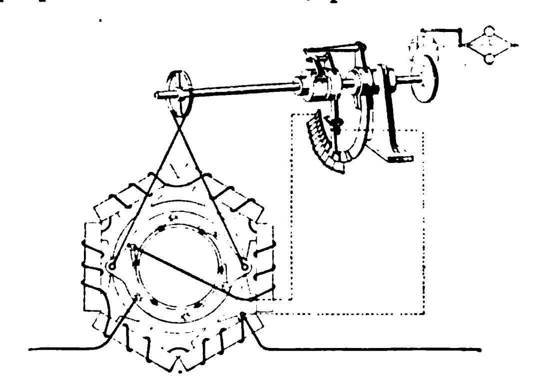


Fig. 213. — Schéma du régulateur de vitesse.



Fig. 214. — Régulateur de vitesse.

régulateur de machine à vapeur agissant pour la première partie du réglage sur les balais, qui sont déplacés plus ou moins par rapport à leur position normale, et ensuite sur les

inducteurs, qui sont shuntés avec des résistances variables.

Le tableau de distribution pour la manœuvre d'un moteur-série est très simple (fig. 215). Indépendamment du by-pass (fig. 216), il comprend un interrupteur de court circuit qui ferme le courant sur le moteur ou met ce dernier hors circuit, tout en assurant la continuité de la ligne à haute tension (fig. 217). Au moment où le circuit est fermé il pourrait, en raison de la self-induction des inducteurs du moteur, se produire une forte étincelle qui détériorerait l'interrupteur. On évite cette éventualité par un pare-étincelles (fig. 218), appareil formé de deux contacts en charbon pouvant se séparer sous l'action d'un électro-aimant en série sur le courant allant au moteur. C'est entre ces blocs de charbon que jaillit l'étincelle de rupture, mais ceux-ci peuvent très bien les supporter et on n'a à les changer que de loin en loin.

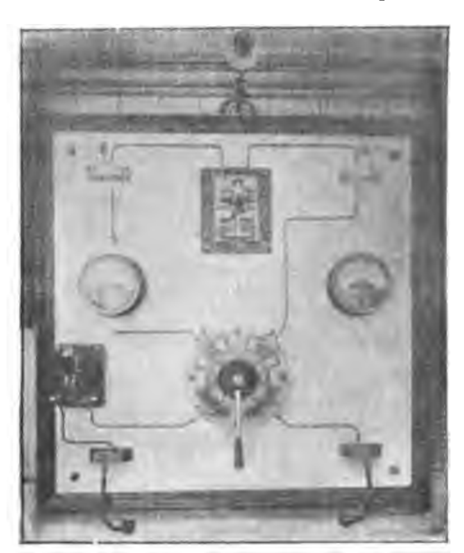


Fig. 215. — Tableau de distribution pour la manœuvre d'un moteur-série.

Nous n'avons rien de spécial à dire de la génératrice à courant continu dont le fonctionnement est identiquement celui d'une génératrice à alimentation directe.

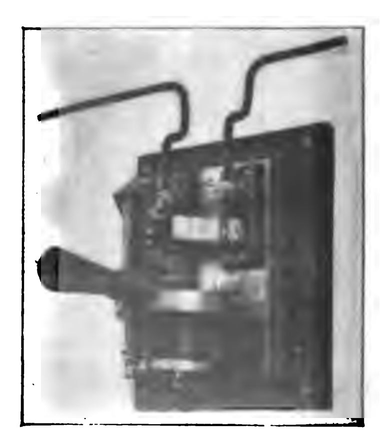


Fig. 216. — By-pass automatique

Sous-station recevant du courant alternatif à haute tension et produisant du courant coutinu à basse tension. — Des sous-stations de cette nature ne sont que très rarement alimentées par du courant alternatif monophasé, attendu que, lorsque l'on veut transporter de l'énergie à distance par des courants alternatifs, on fait une économie de cuivre très sensible en employant, au lieu de courants monophasés, des courants triphasés.

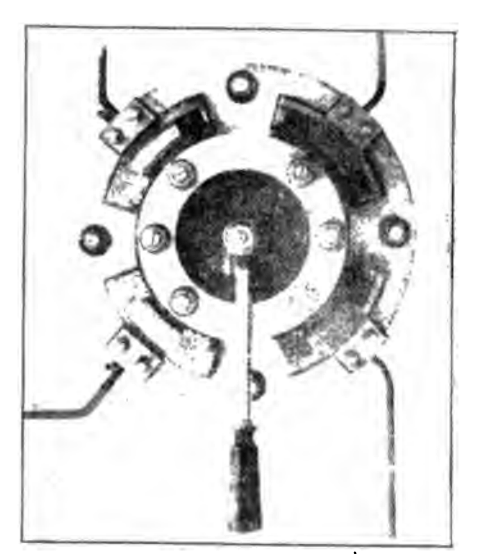


Fig. 217. — Interrupteur à main du tableau de distribution.

Cependant si, pour des raisons spéciales, on était amené à envisager un transport de force par courants monophasés, on pourrait transformer ces derniers en courants continus à l'aide d'un appareil analogue à celui qui sert pour la transformation des courants triphasés et que l'on désigne sous le nom de *convertisseur* ou de *commutatrice*.

Le principe de ces transformateurs se comprendra très aisément si l'on veut bien se reporter au mode de production même du courant dans une dynamo (une dynamo bi-polaire, par exemple). Nous avons vu que les courants engendrés dans les bobines de l'induit étaient des courants alternatifs et qu'ils ne devenaient continus que par l'intervention du *collecteur*. En



Fig. 218. — Pare-etincelle.

sorte que si l'on suppose une dynamo munie, de part et d'autre de son induit, d'un collecteur et de deux bagues isolées, reliées à deux points diamétralement opposés de l'induit (fig. 219), on pourra obtenir soit du courant continu par le collecteur et les balais, soit du courant alternatif par les bagues. Par conséquent une telle machine pourra être considérée à la fois comme une dynamo à courant continu et comme une dynamo à courant alternatif. Et inversement, en raison du principe de la réversibilité, elle pourra fonctionner soit comme moteur à courant continu, soit comme moteur à courant alternatif.

Or, mettons à profit cette dernière propriété et envoyons dans

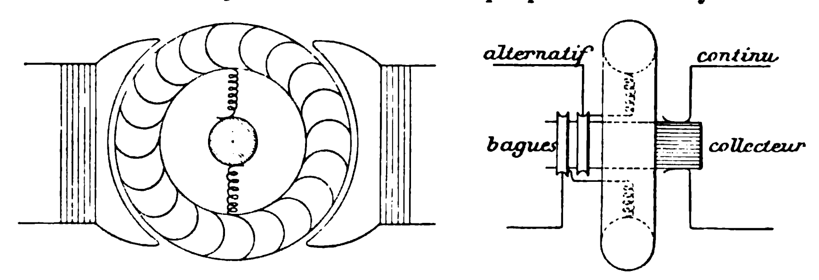


Fig. 219. — Principe de la commutatrice dans le cas du courant alternatif simple.

la machine du courant alternatif sous la tension et avec la fréquence de celui qu'elle est susceptible de produire elle-même ; elle se comportera comme un moteur synchrone et tournera à la vitesse du synchronisme. Mais alors, grâce au collecteur, le courant alternatif se transformera en courant continu et celui-ci, que l'on pourra recueillir par les balais, aura une tension identique à celle que donnait la machine, considérée comme génératrice à courant continu.

De même si l'on envoyait du courant continu dans la machine, par ses balais, elle donnerait, aux bagues, du courant alternatif.

Le mécanisme même de ces transformations indique qu'il doit y avoir une certaine relation entre la tension du courant continu et la tension du courant alternatif. C'est celle qui, étant donnée

une génératrice, existe entre la tension du courant continu qu'elle peut produire aux balais et la tension du courant alternatif qu'elle est susceptible de donner aux bagues.

Cette dernière tension alternative ayant un maximum égal à la tension du courant continu et, d'autre part, la tension efficace d'un courant alternatif étant égale, d'après ce que nous avons vu chapitre I, à la tension maxima divisée par $\sqrt{2}$, on en déduit que, dans une commutatrice monophasée, la tension efficace alternative et la tension du courant continu seront dans le rapport $\frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$.

Par conséquent, si l'on veut obtenir du courant continu à 600 volts, le courant alternatif ne devra être lancé dans la commutatrice qu'à la tension de $0,707 \times 600^v = 424$ volts.

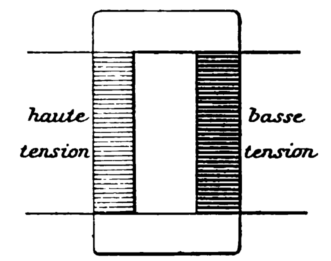


Fig. 220. — Principe du transformateur statique.

On voit donc que les commutatrices ne se prêtent pas directement à la transformation du courant alternatif à haute tension en courant continu à basse tension. Un organe supplémentaire doit intervenir, qui est le *transformateur statique*. Un tel appareil comporte, en principe, deux électro-aimants dont les noyaux sont réunis entre eux, afin de permettre au flux magnétique produit par l'un d'eux d'influencer, avec la moindre perte possible, les spires du deuxième (fig. 220). Le premier électro-aimant, à fil fin, est relié au courant alternatif à haute tension (courant primaire) et produit, par conséquent, dans le noyau, un champ magnétique alternatif. Les spires du deuxième électro-aimant sont, au contraire, à gros fils. Étant soumises, grâce à la continuité du noyau, à un champ alternativement variable elles se trouvent dans la même situation qu'une bobine tournant entre des inducteurs. Elles vont donc devenir le siège de forces élec-

tro-motrices alternatives ; mais, comme le nombre de spires de la bobine à gros fils est bien moins considérable que celui de la bobine à fil fin, la tension résultante sera très inférieure à celle de la tension primaire. On peut ainsi abaisser la tension d'un courant alternatif dans de grandes limites et, en particulier, passer des plus fortes tensions admises dans les lignes primaires aux tensions réduites qui peuvent être seulement supportées par les commutatrices.

Pour en revenir au fonctionnement de ces dernières machines il faut bien préciser que les choses ne se passent point aussi simplement que nous l'avons indiqué, en ce sens que la commutatrice monophasée, considérée comme moteur synchrone, a, comme les moteurs de cette catégorie, l'inconvénient de ne pouvoir démarrer d'elle-même. Certains artifices doivent donc être employés pour la mise en route et nous allons indiquer quelle est la principale manière de la réaliser.

Il faut, pour obtenir l'*accrochage*, commencer par amener la machine à la vitesse du synchronisme ; on la branchera, à ce moment, sur le courant alternatif et elle pourra, alors, continuer à fonctionner comme moteur synchrone.

On amène très aisément la commutatrice à sa vitesse d'accrochage, quand on a du courant continu à sa disposition, en envoyant du courant dans la machine par les balais. La machine se comporte comme un moteur à courant continu et démarre franchement. Sa vitesse croît et il s'établit, aux bagues, une différence de potentiel alternative, également croissante, et que l'on peut mettre en évidence, en branchant sur les bagues des lampes à incandescence de tension appropriée. Supposons que ces lampes puissent être également alimentées par le courant primaire, après son passage dans les transformateurs statiques, par une disposition identique à celle que nous avons indiquée pour l'*indicateur de phase* des machines à courant alternatif (voy. page 50). Ces lampes s'allumeront et s'éteindront, alternativement, jusqu'à

ce que la commutatrice et le courant primaire soient en concordance de phase. A ce moment les lampes resteront allumées et brûleront avec leur maximum d'éclat. C'est cet instant que l'on choisira pour brancher la commutatrice sur le courant primaire.

Sous-station recevant du courant triphasé à haute tension et produisant du courant continu à basse tension. — Si, maintenant, nous envisageons le cas beaucoup plus usuel de la transformation du courant triphasé en courant continu, il nous sera facile,

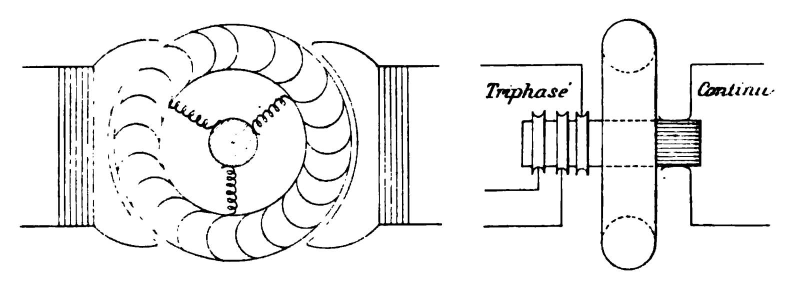


Fig. 221. — Principe de la commutatrice dans le cas des courants triphasés.

grâce aux principes précédemment exposés, de montrer comment une telle transformation pourra être obtenue.

Revenons, en effet, au mode de génératrice du courant dans une dynamo bi-polaire et considérons trois points de l'induit situés aux extrémités de rayons faisant entre eux des angles de $\frac{360°}{3} = 180°$ (fig. 221). Les tensions alternatives engendrées en chacun de ces trois points seront décalées l'une par rapport à l'autre d'un tiers de période et, par conséquent, si on réunit les trois points considérés à trois bagues isolées, montées sur l'arbre de l'anneau, on obtiendra dans ces bagues des tensions triphasées susceptibles de produire dans des circuits utilisateurs des courants triphasés. Donc, et sans revenir sur ce qui a été dit plus haut à l'occasion des courants monophasés, on réalisera une commutatrice à courants triphasés en prenant une commutatrice non plus à deux.

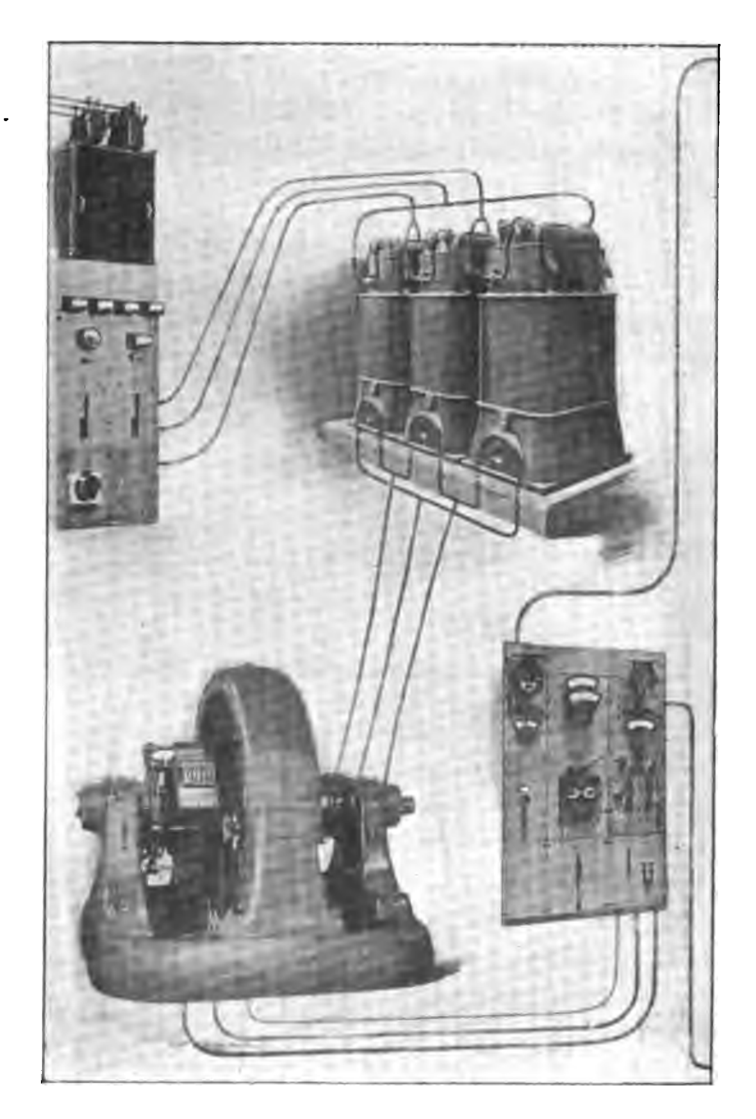


Fig. 222. — Ensemble d'une commutatrice et de ses transformateurs (General électric company).

mais à trois bagues; seulement le rapport qui existait dans le pre-

mier cas, entre la tension efficace du courant alternatif et la tension du courant continu se trouvera modifié et l'on aura :

Tension efficace polygonale du courant triphasé = tension du courant continu $\times \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}}$ = tension du courant continu $\times$ 0,612.

Donc le coefficient de transformation des transformateurs statiques sera différent, ceux-ci devant être capables, si l'on a en vue,



Fig. 223. — Transformateur pour courants triphasés.

par exemple, une production de courant continu à 600 volts d'abaisser la tension du courant triphasé à $600 \times 0,612 = 367$ volts.

Les transformateurs statiques seront constitués comme des transformateurs à courants triphasés, mais on en prendra trois, à raison d'un par phase (fig. 222 et 223).

Bien qu'alimentée par des courants triphasés, la commutatrice ne s'en comportera pas moins comme un moteur synchrone et son démarrage ne pourra être obtenu que moyennant certaines combinaisons.

Si, comme dans le cas envisagé pour les commutatrices monophasées, on dispose d'une source de courant continu, circonstance qui se présente naturellement quand la commutatrice doit être branchée sur une ligne de distribution déjà en charge, il sera facile de mettre la machine en route en la faisant tourner comme moteur à courant continu. L'accrochage se fera, ensuite, comme il a été dit pour les commutatrices monophasées. La grande commodité d'un tel système de démarrage a même conduit, dans certaines sous-stations importantes (exemple, chemin de fer élevé de New-York), à installer des groupes de démarrage, composés d'un moteur à courants triphasés actionnant une petite dynamo à courant continu.

Les courants triphasés permettant d'alimenter non seulement des moteurs synchrones, mais aussi des moteurs asynchrones, à champ tournant, on pourra, en montant un petit moteur de cette dernière catégorie sur l'arbre même de la commutatrice, mettre le moteur en route en l'alimentant directement par le courant triphasé. On s'arrange généralement pour que le moteur de démarrage tourne en marche normale à une vitesse un peu supérieure à celle de la commutatrice, et, quand cette vitesse est atteinte, on coupe le courant, laissant la machine tourner sous sa seule force vive. Un léger ralentissement se produit et l'on arrive ainsi graduellement au moment du couplage, en sorte que celui-ci peut être saisi très facilement, ce qui permet d'effectuer l'accrochage avec une grande sûreté.

Ces deux procédés de démarrage (courant continu d'une part, moteur asynchrone d'autre part) sont de beaucoup les plus usités. A la rigueur on pourrait n'avoir recours qu'aux courants triphasés eux-mêmes, car, en circulant dans l'induit, ils créeraient un champ tournant qui, par réaction sur les inducteurs, provoquerait la rotation de l'induit. Mais un tel démarrage comporte un grand appel de courant, ainsi qu'une augmentation du cos φ du réseau et il n'est guère recommandable que si la puissance

de la commutatrice est assez faible, relativement à la puissance totale distribuée.

Même, dans ce cas, il sera bon d'effectuer le démarrage, non pas avec le courant triphasé, tel qu'il sort des transformateurs, mais avec du courant à tension plus réduite, soit que l'on fasse usage de transformateurs spéciaux, soit que l'on intercale sur le circuit venant des transformateurs, un transformateur dévolteur. On devra également ne pas oublier que, pendant la période initiale de démarrage, le champ tournant produit par l'induit agira sur les spires des inducteurs, créant dans celles-ci une certaine force électro-motrice. Comme le nombre des spires est considérable (souvent 3 à 4 000) la tension résultante pourra être très élevée et elle risquera de compromettre les isolants : aussi fera-t-on bien de diviser les spires des inducteurs en trois ou quatre « galettes » que l'on mettra à circuit ouvert, pendant les cinquante à soixante secondes que durera le démarrage.

Pour bien faire comprendre le mode de fonctionnement des commutatrices il nous reste à dire quelques mots de leur *excitation.*

Les circuits inducteurs sont généralement excités en *dérivation* sur le courant continu pris aux balais. Une commutatrice, considérée comme dynamo à courant continu, est donc une dynamo shunt. Mais en vue d'obtenir un réglage automatique de la tension, on a combiné aussi des commutatrices *Compound*, c'est-à-dire des commutatrices dans lesquelles les inducteurs sont munis d'un double enroulement : *enroulement en série* dans lequel passe la totalité du courant continu envoyé par la commutatrice aux barres du tableau, et *enroulement en dérivation*, comme dans le premier cas.

Pour se rendre compte de l'utilité de l'enroulement Compound il faut se souvenir que, dans une commutatrice, on peut faire varier la tension en augmentant ou diminuant l'excitation [1]. Si

[1] Les choses ne se passent pas comme dans une dynamo à courant continu. En

l'enroulement est seulement en dérivation il faudra agir sur un rhéostat. Mais l'adjonction d'un enroulement-série qui est traversé par un courant d'autant plus intense que l'appel de courant est lui-même plus élevé donne automatiquement, à ce moment, une augmentation de l'excitation et par suite de la tension.

Les commutatrices ont une aptitude des plus remarquables à supporter les surcharges. Cette qualité les rend d'un emploi particulièrement commode dans les sous-stations alimentant une ligne

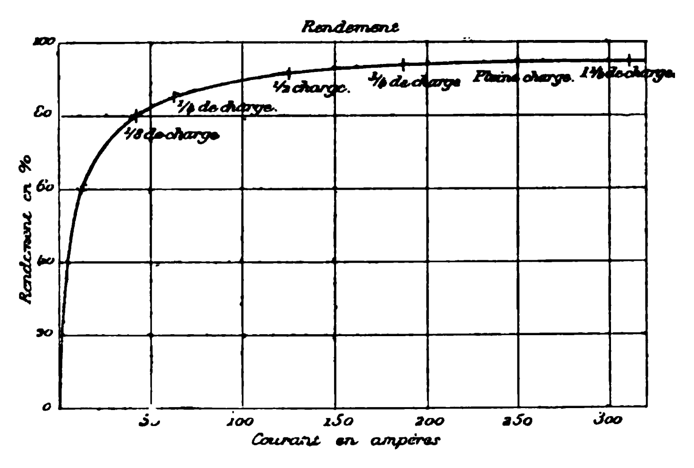


Fig. 224. — Rendement d'une commutatrice.

de chemin de fer et permet à celles-ci d'assurer l'alimentation de la ligne, même si plusieurs démarrages ont lieu simultanément.

Il est d'ailleurs à noter que, même à des régimes très variés, le rendement des commutatrices est toujours très élevé, comme le

diminuant l'excitation, on augmente le décalage qui existe toujours plus ou moins dans le circuit d'alimentation à courant triphasé ; autrement dit on crée une résistance apparente pour le courant alternatif dont la tension se trouve diminuée et, en raison du rapport existant entre la tension du courant continu et celle du courant alternatif, il y a baisse de voltage sur la commutatrice. L'augmentation de l'excitation crée un décalage en sens inverse, c'est-à-dire agit comme une capacité. La Cie Thomson-Houston facilite cette action de réglage par l'excitation, en insérant sur le circuit des courants triphasés une petite bobine de réaction.

montre la figure 223, qui donne la courbe des rendements pour une commutatrice de 180 kilowatts.

Enfin le couplage en parallèle des commutatrices se fait également avec facilité. Il faudra cependant, si l'on a affaire à des commutatrices Compound, relier les bornes des enroulements-série par des câbles de compensation.

Nous représentons par la figure 225 une commutatrice triphasée Compound de 300 kilowatts, de la C[ie] Thomson-Houston. La machine est à 6 pôles. Il est à remarquer, en effet, que si, pour la commodité de la démonstration, nous avons envisagé

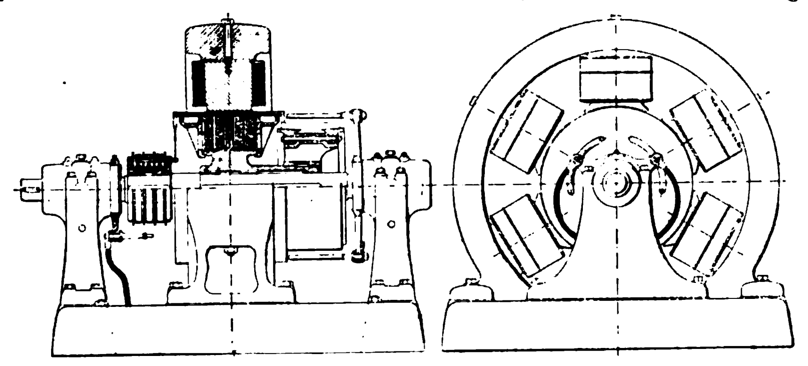


Fig. 225. — Commutatrice pour courants triphasés, Thomson-Houston (300 kilowatts).

précédemment une commutatrice bi-polaire, on a toujours recours, dans la pratique, à plus de deux pôles, la matière se trouvant dans ce dernier cas, mal utilisée. Les noyaux inducteurs sont en acier coulé, d'une section circulaire, il sont fixés à la carcasse par un seul boulon. L'enroulement inducteur étant Compound, chaque noyau inducteur est entouré de deux bobines : l'une à fil fin (1,5 mm. de diamètre) comportant 2 890 spires, l'autre à gros fil (bandes de cuivre de 65 millimètres sur 5,5 mm.). Pour éviter la production de fortes tensions dans les bobines à fil fin, quand on veut démarrer avec le courant triphasé, on a divisé chaque bobine shunt en trois tronçons de deux bobines.

L'induit est formé par des disques en tôle empilés perpendiculairement à l'arbre et à la périphérie desquels sont ménagées 216 rainures, qui reçoivent 432 sections réunies par des développantes aux 432 lames du collecteur.

Les bagues pour le courant alternatif sont en bronze.

On peut voir, par la figure 226, comment, sous les variations

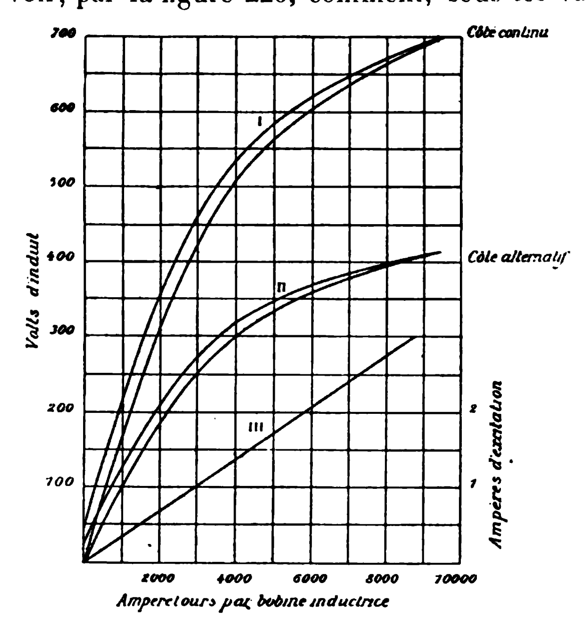


Fig. 226. — Relation entre la tension du courant triphasé et celle du courant continu.

de l'excitation, se présentent les tensions à la fois du courant continu et du courant alternatif. Les courbes sont doubles parce qu'elles ont été prises d'abord pour des excitations croissantes et ensuite pour des excitations décroissantes. La figure 227 est également intéressante à consulter, car elle donne une idée de ce que l'on appelle la courbe en V d'une commutatrice. Elle est relative à l'intensité du courant continu, en fonction, du courant d'excitation, dans le fonctionnement comme moteur synchrone à vide. La

ligne située dans le haut de la figure représente la tension aux bagues[1].

Dans une telle commutatrice, le rendement à pleine charge est de 94,8 p. 100. Les pertes se décomposent comme il suit :

Pertes à vide (frottements, hystérésis, courants de Foucault)	9 810 watts.
Pertes par effet Joule dans l'induit	5 350 —
Pertes par effet Joule dans l'inducteur (série et shunt)	1 690 —
Total.	16 850 watts.

Les transformateurs statiques sont à soufflage d'air forcé (fig. 228). On dispose d'un transformateur pour chaque phase, en sorte que l'abaissement de la tension du courant triphasé à haute tension nécessite, en somme, trois transformateurs monophasés, montés en triangle. Chaque transformateur a une puissance égale à environ 1/3 de celle de la commutatrice. Le circuit magnétique est constitué par des tôles empilées les unes sur les autres et qui sont découpées au préalable, de manière à permettre le logement dans leurs découpures centrales des bobines à haute et à basse tension (fig. 229). Celles-ci sont au nombre de 4, savoir : deux bobines à haute tension, au

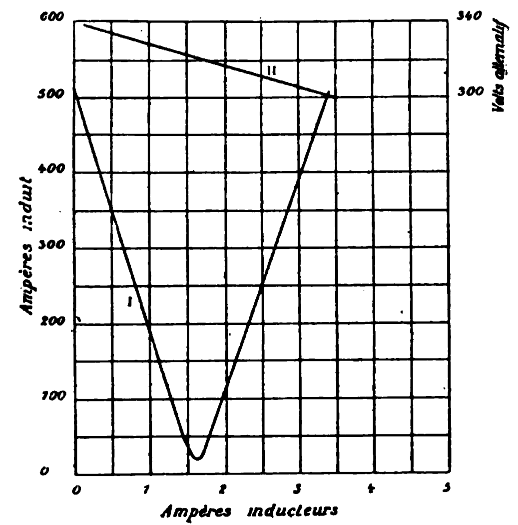


Fig. 227. — Intensité du courant continu en fonction de l'intensité du courant d'excitation.

[1] *Éclairage électrique*. Tome XXVII, n° 14.

milieu, avec 396 spires de fil de 10,79 millimètres carrés et deux bobines à basse tension, de part et d'autre, avec 27 spires de fil de 198 millimètres carrés.

De petits intervalles sont ménagés entre les bobines, pour permettre la circulation de l'air. Dans un ordre d'idée analogue les tôles du circuit magnétique sont groupées par paquet et chaque paquet est séparé des deux avoisinants par des cales.



Fig. 228. — Transformateur statique Thomson-Houston.

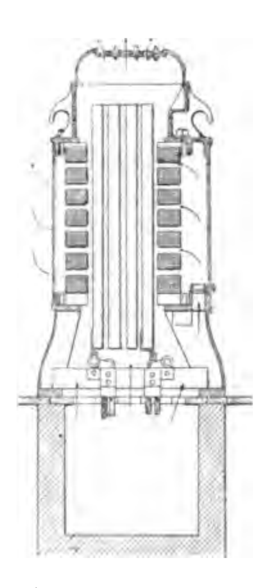


Fig. 229. — Dispositions intérieures d'un transformateur statique Thomson-Houston.

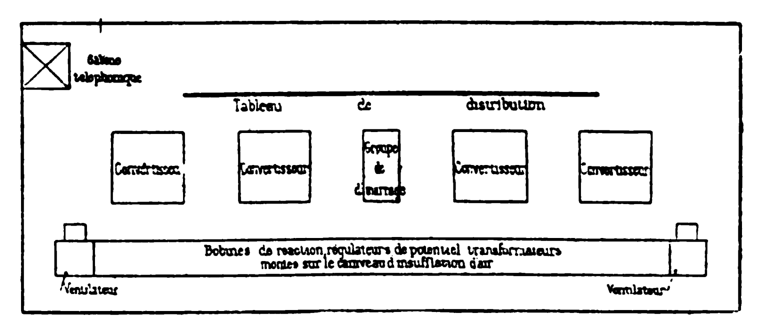
Chaque transformateur est placé sur un petit caniveau en maçonnerie par lequel arrive l'air d'insufflation. Celui-ci traverse tout l'appareil et s'échappe par des ouvertures ménagées dans la partie supérieure de l'enveloppe.

Le rendement de tels transformateurs est très élevé, atteignant 96 à 97 p. 100 à pleine charge et 95 p. 100 à moitié charge.

Le refroidissement des transformateurs par un courant d'air

oblige, quand il est employé, à installer dans la sous-station un petit groupe auxiliaire composé d'un moteur à champ tournant et d'un ventilateur.

C'est évidemment une petite complication; mais le rendement



Vue en plan.



Vue en perspective.

Fig. 230. — Sous-station du Champ-de-Mars (ligne des Invalides au Champ-de-Mars).

des transformateurs ne pourrait, sans cela, atteindre des valeurs aussi élevées que celles qui ont été indiquées.

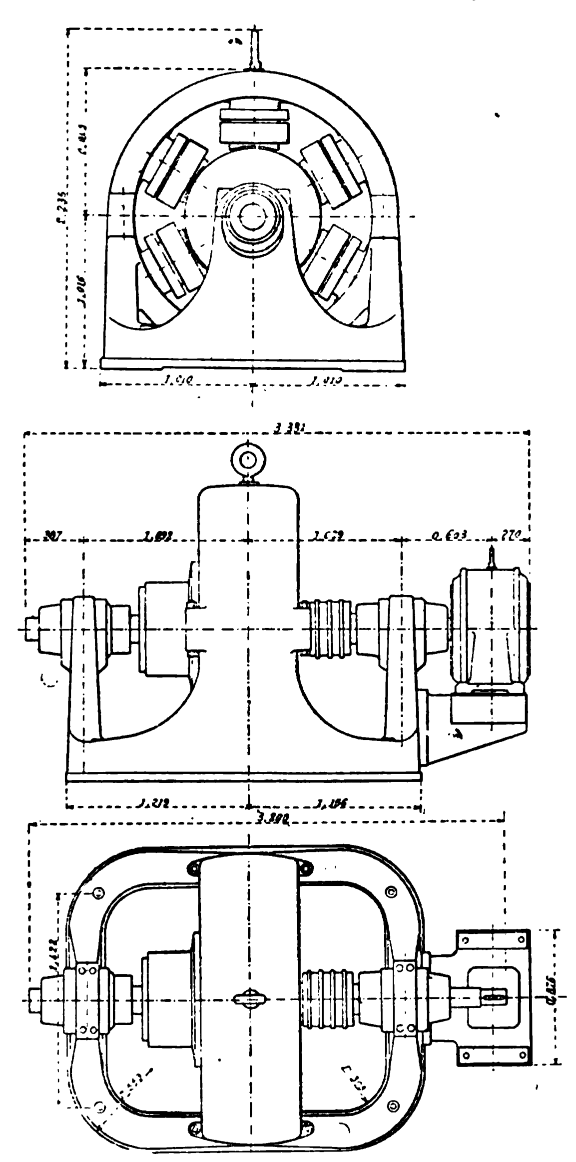


Fig. 231. — Commutatrice Westinghouse de 450 kilowatts.

C'est avec des commutatrices du type qui vient d'être décrit

qu'ont été équipées les sous-stations de transformation de la nouvelle ligne des Invalides à Versailles (Paris). La ligne, qui a 17 kilomètres de longueur, est alimentée par trois sous-stations dans lesquelles on transforme en courant continu 550 volts le courant triphasé 5000 volts, 25 périodes, produit dans la station

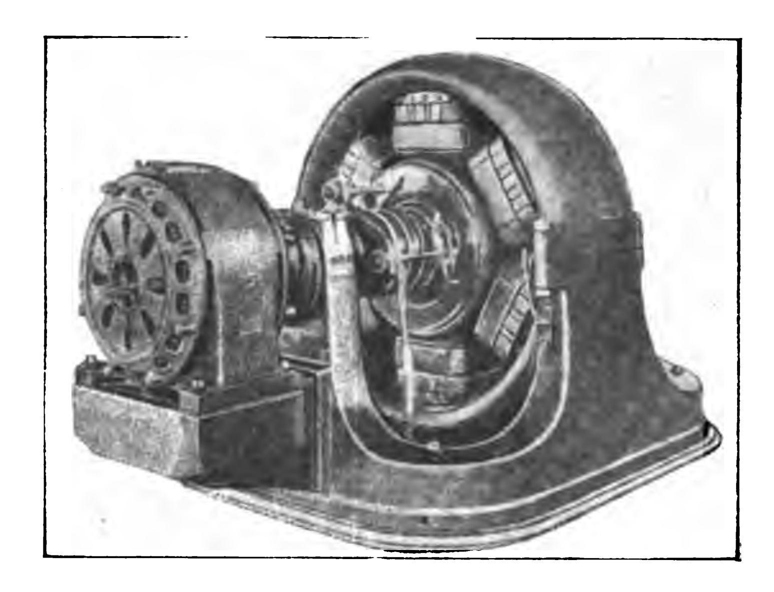


Fig. 232. — Moteur de démarrage.

centrale des Moulineaux. Il y a quatre commutatrices par sous-station, réparties comme l'indique la figure 230. Le démarrage pourrait s'effectuer par le courant triphasé. Mais, pour les raisons générales exposées précédemment, les ingénieurs de la Cie de l'Ouest ont préféré monter dans la sous-station un groupe spécial de démarrage constitué par un moteur asynchrone actionnant une génératrice à courant continu. Et même, pour éviter toute répercussion gênante sur le réseau au moment de la mise en marche du moteur asynchrone, ils ont prévu que le branchement du moteur sur le courant triphasé se ferait par un réducteur de

potentiel qui abaisse de 10 p. 100 la tension du courant à la sortie

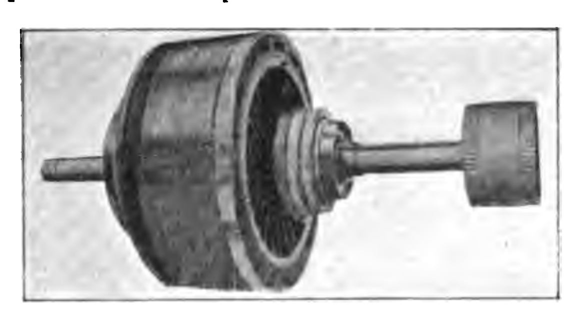


Fig. 233. — Arbre de la commutatrice montrant le rotor du moteur de démarrage.

des transformateurs. Il est à remarquer que, moyennant l'instal-



Fig. 234. — Transformateur statique Westinghouse, à bain d'huile.

lation du groupe de démarrage, la sous-station se trouve dans une indépendance complète vis-à-vis du réseau.

Les transformateurs, à raison de trois par commutatrice, sont placés en ligne et reposent sur un caniveau en maçonnerie dans lequel un ventilateur électrique refoule l'air nécessaire à leur ventilation (fig. 230).

La figure 231 représente une commutatrice de 450 kilowatts, de la Cie Westinghouse. C'est celle qui actionnait le *chemin de fer électrique de l'Exposition*. C'est encore une commutatrice Compound, mais elle présente cette caractéristique, qu'elle porte, sur son arbre, son moteur de démarrage (moteur asynchrone à courant triphasé) (fig. 232 et 233).

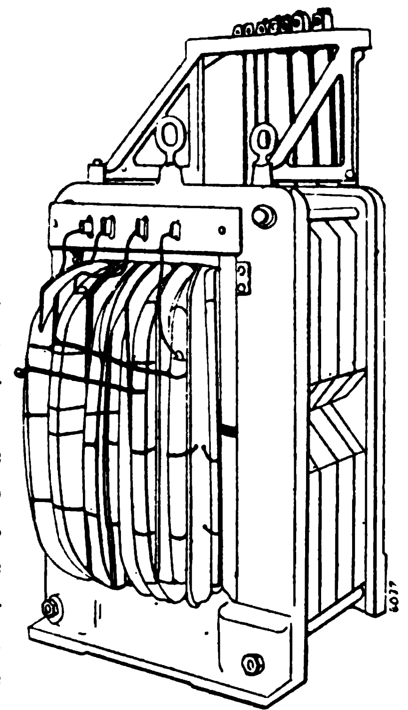


Fig. 235. — Bobines du transformateur Westinghouse.

Le courant triphasé à haute tension était à 5 000 volts et 25 périodes, et passait dans des transformateurs à bain d'huile (fig. 234), qui abaissaient la tension à 350 volts. Il y avait un transformateur pour chaque phase et pour une même commutatrice les trois transformateurs étaient réunis en triangle. Chaque transformateur avait une puissance de 150 kilowatts.

Les transformateurs à bain d'huile de la Cie Westinghouse sont du type cuirassé à circuit magnétique double (fig. 235). Les bobines secondaires sont intercalées entre les bobines primaires, et peuvent être groupées entre elles, de manière à permettre la modification éventuelle du coefficient de transformation. L'appareil a été spécialement combiné en vue de diminuer les différences de potentiel entre les bobines et de présenter une grande

surface de refroidissement. Quant à l'huile, elle intervient doublement. D'abord comme isolant et ensuite comme substance permettant facilement la dispersion de la chaleur. A ce dernier point de vue on remarquera que l'enveloppe extérieure du transformateur est ondulée, de manière à augmenter notablement la surface extérieure de refroidissement. Dans ces conditions, la ventilation n'est plus nécessaire.

Le rendement de tels transformateurs est :

Avec une surcharge de 25 p. 100	. . . . . .	96,6 p. 100.
A pleine charge . .	—	96,7 —
A 3/4 de charge . .	—	96,5 —
A 1/2 de charge . .	—	96 —
A 1/4 de charge . .	—	93,3 —

Entre la marche à vide et la marche à pleine charge, les écarts de tension ne sont pas supérieurs à 2 p. 100.

Les écarts de température avec la température ambiante ne sont pas supérieur à;

45° pour une marche à pleine charge pendant 24 heures;

50° pour une marche avec surcharge de 25 p. 100 pendant 24 heures.

L'appareil peut, d'autre part, très bien supporter pendant une heure ou deux une surcharge de 50 p. 100.

Enfin le poids est :

Transformateur proprement dit.	1 134 kg.
Caisse.	907 —
Huile (1 105 litres)	771 —
Total.	2 812 kg.

Dans son ensemble la commutatrice présente des dispositions analogues à celle de la commutatrice de 300 kilowatts déjà décrite. Notons seulement que les noyaux inducteurs sont en tôles lamellaires. Cette disposition, qui a des avantages au point de vue du rendement, rend le démarrage direct par courants triphasés moins

facile. Mais la Cie Westinghouse préfère avec raison ne pas employer ce système de démarrage. Nous avons d'ailleurs vu précédement que la Cie de l'Ouest, bien que pouvant l'appliquer avec ses commutatrices de la ligne des Invalides, évite d'y avoir recours.

Le démarrage par le moteur asynchrone s'effectue très facilement. Ce moteur ayant 4 pôles, au lieu de 6, tournera moitié plus vite que la commutatrice (750 tours pour 500 tours). On le branche d'abord sur le milieu des enroulements secondaires des transformateurs statiques, c'est-à-dire sur 175 volts, puis, quand il est en vitesse, on l'alimente à 350 volts. Il arrive ainsi, et sans à-coup pour le réseau, à tourner à 750 tours. On coupe alors le courant et pendant le ralentissement on saisit très facilement le moment de l'accrochage.

Le rendement de la commutatrice est :

A pleine charge	94,5 p. 100.
A 3/4 de charge	93,5 —
A 1/2 de charge.	91,5 —

Pour une marche à pleine charge pendant 24 heures (818 ampères sous 550 volts), la température de la machine ne dépasse pas de plus de 45° la température ambiante. Enfin la machine est capable de supporter une surcharge de 25 p. 100 pendant 24 heures, et une surcharge de 50 p. 100 pendant 1 ou 2 heures.

La figure 236 montre une des commutatrices de 500 kilowatts employées sur le *chemin de fer de Milan à Varèse*[1]. Le courant triphasé à 11 000 volts, 15 périodes, est abaissé par des transformateurs à ventilation forcée à 420 volts et se rend sous cette tension dans la commutatrice. Celle-ci est à 6 pôles. Le démarrage de la commutatrice se fait soit par le courant alternatif, soit par le courant continu.

[1] Ce chemin de fer est alimenté par cinq sous-stations placées à des distances moyennes de 16 kilomètres. Malgré ce grand espacement des sous-stations on a pu se dispenser de feeders à courant continu.

La commutatrice tourne à 600 tours. Son encombrement est de 2,74/2,63 m. Son poids atteint 14 500 kilogrammes.



Fig. 236. — Commutatrice de 500 kilowatts du chemin de fer de Milan à Varèse.

Le rendement mesuré est de :

A pleine charge.	93,2 p. 100.
A 3/4 de charge	92,2 —
A 1/2 de charge	89,5 —

Après 24 heures de marche à pleine charge la température de la machine ne dépasse pas, de plus de 50 p. 100, la température ambiante.

Les transformateurs statiques sont des transformateurs monophasés de 180 kilowatts réunis par trois en triangle, chaque commutatrice étant alimentée par un groupe spécial de trois transformateurs. Après une marche de 10 heures à pleine charge, mais avec ventilation, aucune partie de ces transformateurs ne doit présenter un écart de plus 40° avec la température ambiante.

La chute de tension entre la pleine charge et la marche à vide,

pourvu que la tension primaire soit constante, ne doit pas être supérieure à 1,5 p. 100.

Enfin leur rendement est :

A pleine charge	97 p. 100.
A 3/4 de charge	96,6 —
A 1/2 de charge	95,8 —
A 1/4 de charge	92,8 —

Lorsque, pour la transformation, on adopte des commutatrices de grande puissance (au-dessus de 5 à 600 kilowatts) on a intérêt, pour assurer une meilleure répartition des courants alternatifs

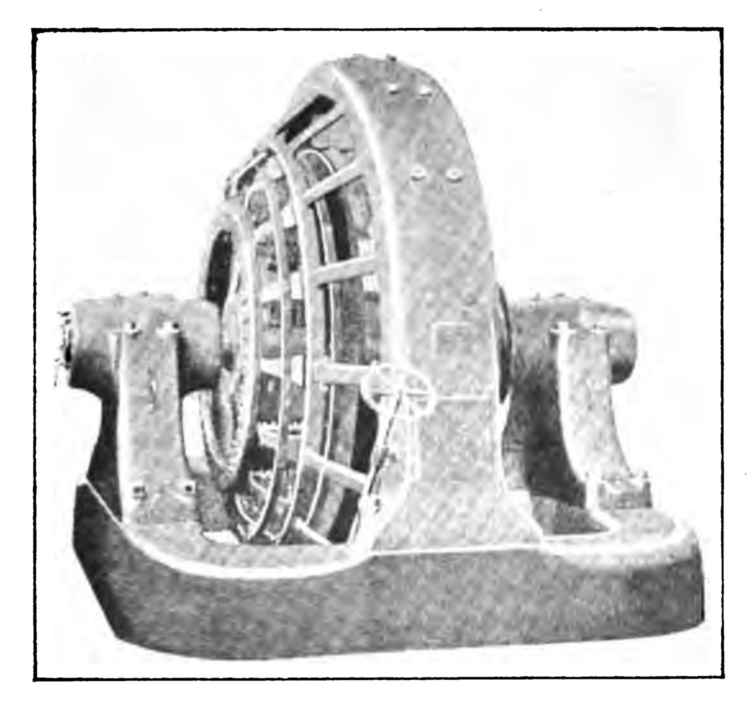


Fig. 237. — Commutatrice Thomson-Houston, de 1000 kilowatts.

dans l'induit et pour diminuer la densité du courant dans les bagues et les conducteurs qui les relient à l'induit, à prendre des

commutatrices à 6 bagues. Dans ce cas les secondaires des transformateurs statiques ne sont plus montés en triangle; chacun d'eux est séparé des autres et ce sont les six extrémités de ces trois enroulements qui sont reliées aux bagues. La commutatrice se comporte alors comme une machine à six phases.

C'est à ce type que se rapporte la commutatrice Thomson-

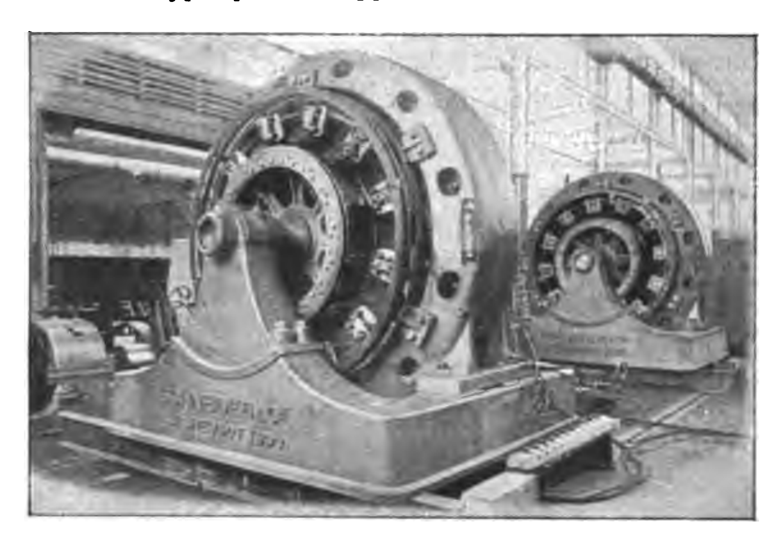


Fig. 238. — Commutatrice Ganz, de 750 kilowatts. (Chemin de fer métropolitain de Paris.)

Houston, représentée par la figure 237. Cette machine a une puissance de 1 000 kilowatts.

Les commutatrices du chemin de fer métropolitain de Paris sont également à 6 bagues (fig. 238). Elles ont été fournies par la maison Ganz, de Budapest. Ces machines ont une puissance normale de 750 kilowatts, mais peuvent en fournir facilement 1 000. Elles pèsent 26 tonnes environ. Leur rendement à pleine charge est de 95 p. 100.

Enfin, comme commutatrices de très grandes puissances, nous citerons celles du chemin de fer élevé de New-York, qui sortent

des ateliers de la Westinghouse Company à Pittsburg et qui peuvent développer normalement 1 500 kilowatts (fig. 239). Le courant primaire arrive dans les sous-stations à la tension de 10 500 volts (25 périodes) et passe d'abord dans des transformateurs statiques



Fig. 239. — Commutatrice de 1500 kilowatts, du Manhattan Railway, New-York.

de 550 kilowatts qui abaissent sa tension à 390 volts. Ces transformateurs sont du type monophasé; les enroulements primaires montés en triangle et les enroulements secondaires sont séparés, en sorte que le courant à basse tension se rend aux commutatrices par 6 conducteurs.

Une disposition intéressante a été prévue pour tenir compte de l'éloignement plus ou moins grand des sous-stations à l'usine génératrice et des pertes de charge qui se produisent dans les câbles primaires. Les transformateurs statiques sont munis de

prises différentes de courants qui permettent de faire varier le coefficient de transformation; en sorte que, même si le courant arrive dans les sous-stations à une tension inférieure à 10 500 volts, on peut encore obtenir du courant, après transformation, à 390 volts.

Les transformateurs sont à ventilation; leur rendement atteint à pleine charge 97,5 p. 100, à moitié charge 97 p. 100 et à quart

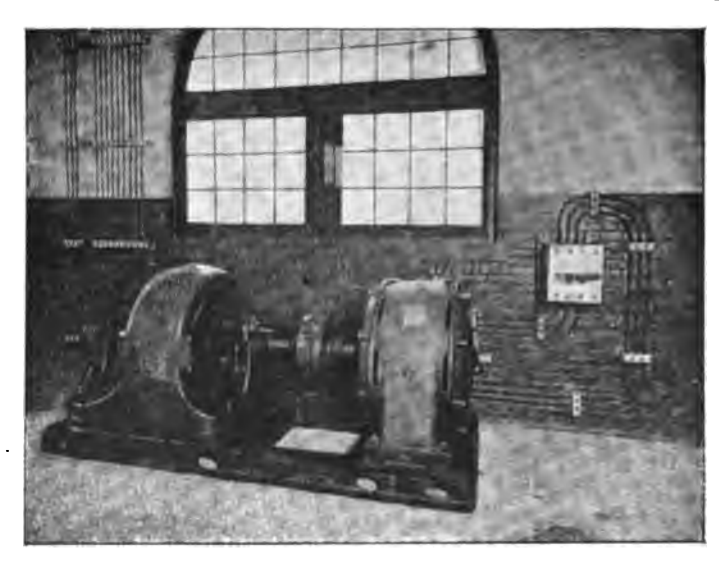


Fig. 240. — Groupe de démarrage des commutatrices de 1500 kilowatts du Manhattan Railway.

de charge 95 p. 100. A charge normale, l'élévation de température ne doit pas dépasser, de plus de 36°, la température ambiante.

Les commutatrices, bien qu'étant de 1 500 kilowatts, peuvent donner, pendant plusieurs heures, 2 258 kilowatts. Elles sont Compound, ont 12 pôles et tournent à 250 tours. Le courant continu qui en sort a une tension de 625 volts. Le rendement est 95,75 p. 100 à pleine charge, 95,25 p. 100 à trois quarts de charge, 93,50 p. 100 à moitié charge et de 89 p. 100 à quart de charge.

Le démarrage peut se faire par courant continu emprunté au

réseau; mais, comme l'appel de courant qu'un démarrage ainsi effectué comporte peut avoir une influence fâcheuse sur le voltage de la ligne, on préfère démarrer à l'aide d'un groupe auxiliaire, comprenant un moteur à courant triphasé et une génératrice à courant continu (fig. 240). Nous avons fait connaître plus haut ce système spécial de démarrage.

Dispositions intérieures des sous-stations avec commutatrices.

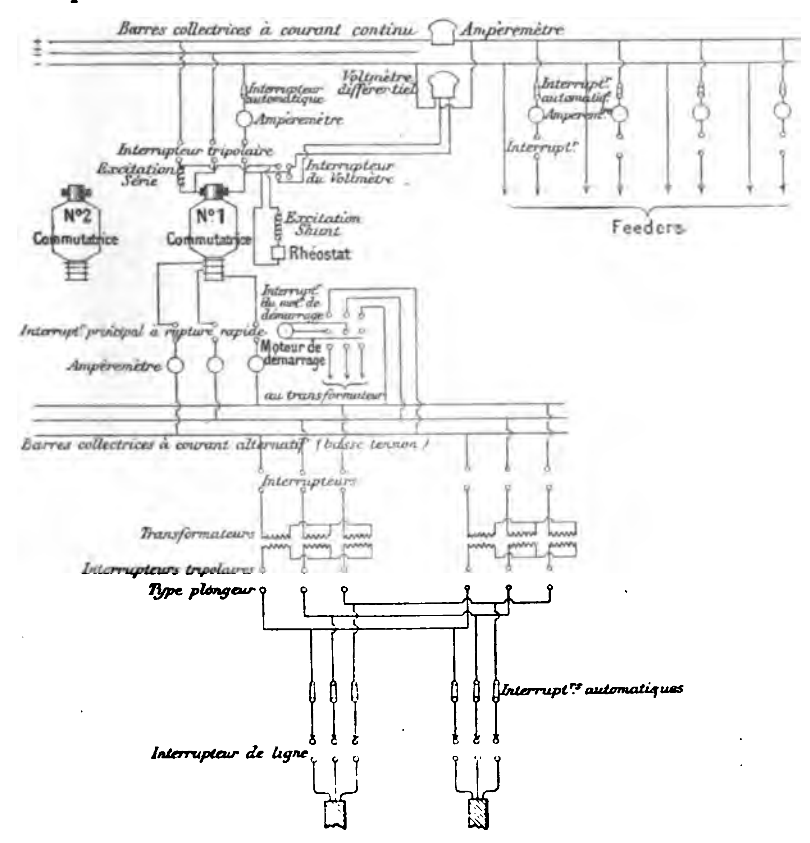


Fig 241. — Disposition schématique des circuits dans une sous-station.

— Une sous-station de transformation constitue, en réalité, une

véritable usine, avec cette complication qu'elle est à la fois à haute tension et à basse tension.

On fera donc bien, en vue d'éviter des accidents, d'établir dans toute l'organisation intérieure une séparation bien nette entre les appareils à basse tension et ceux à haute tension. De plus, les conducteurs à haute tension devront se distinguer, par leur couleur, de ceux à basse tension.



Fig. 242. — Emplacement du tableau de distribution.

Le courant arrivera dans la sous-station soit par un câble à 3 conducteurs (cas des câbles isolés), soit par 3 câbles nus[1]. Le premier appareil à placer est un *interrupteur de ligne* qui permettra d'isoler complètement les câbles de la sous-station et qui facilitera d'ailleurs, les mesures d'isolement à effectuer sur la ligne (fig. 241). Dans le cas du câble à 3 conducteurs, on ménagera, avant l'interrupteur de ligne, un *capot d'extrémité*, dans lequel les câbles seront bien nettement séparés les uns des autres

[1] Dans le cas des câbles aériens un parafoudre devra être placé à l'entrée de la sous-station. Nous parlerons plus loin de cet appareil.

et jonctionnés avec 3 câbles ou 3 barres allant à l'interrupteur de ligne.

Puis, comme premier appareil du tableau de distribution, on trouvera un interrupteur tri-polaire par exemple du type plongeur Westinghouse Company), ou du type à huile (Thomson Houston.) Ces appareils sont combinés de telle façon que les arcs qui peu-

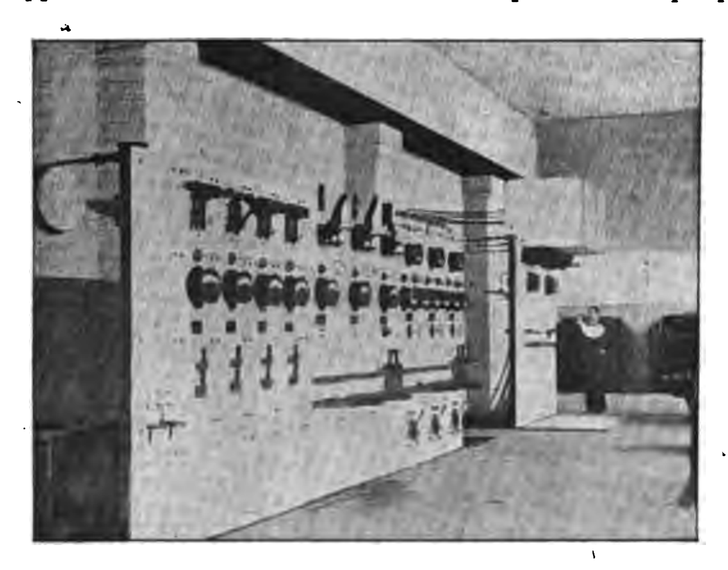


Fig. 243. — Vue d'un tableau de distribution de sous-station.

vent se former à la rupture des circuits soient rapidement éteints soit par suite de la dilatation de l'air, dans le premier cas, soit par l'huile, dans le second.

On arrive ainsi à l'*interrupteur automatique*, appareil indispensable pour protéger aussi bien les câbles à haute tension que la sous-station. Nous avons déjà décrit cet appareil en parlant des usines (voy. p. 60).

Puis le courant se rend aux transformateurs par un interrupteur tri-polaire commandant chaque groupe de transformateurs. Il revient ensuite au tableau à haute tension et passe encore

par un interrupteur, avant d'aller au tableau à basse tension.

Le *tableau à basse tension* présentera trois divisions (fig. 242 et 243).

a) Un tableau pour le courant alternatif à basse tension;



Fig. 244. — Disposition intérieure d'une sous-station (chemin de fer d'Orléans).

b) Un tableau pour le courant continu;

c) Un tableau départ de feeders.

Le tableau « alternatif » supportera l'indicateur de phase, les appareils de démarrage et aussi le rhéostat de champ, car il faut que l'on ait celui-ci sous la main, dès que l'accrochage aura été effectué.

Quant aux deux autres tableaux il seront identiques, au nombre d'appareils près, à ceux d'une usine génératrice.

Il va sans dire que les tableaux devront être bien isolés, et être

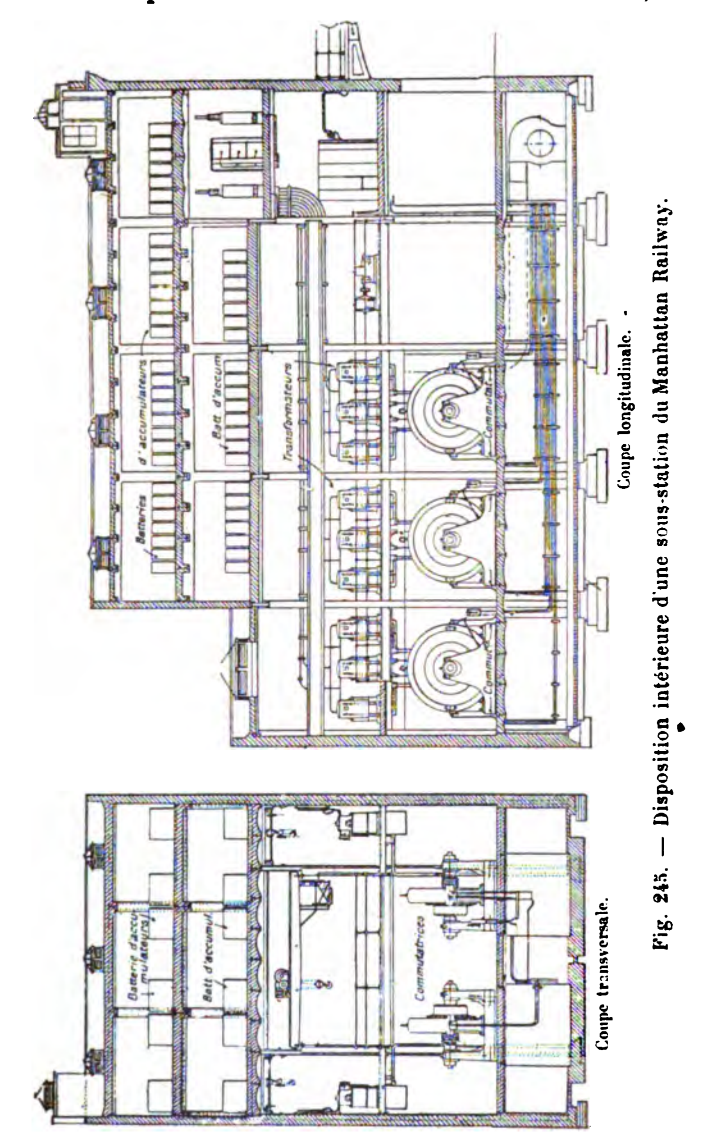


Fig. 245. — Disposition intérieure d'une sous-station du Manhattan Railway.

en matière incombustible (marbre, ardoise, etc.). Il est recom-

mandable d'installer, à l'avant du tableau à haute tension, un plancher bien isolé. Et, quand il s'agit même de stations de transformation pour très haute tension, on s'arrange pour que tout ce qui entoure l'ouvrier chargé de la manœuvre des appareils (par exemple les parois) soit également isolé.

Les câbles allant du tableau aux commutatrices seront placés dans des caniveaux suffisamment vastes pour que l'on puisse les visiter et disposés de telle façon que l'eau ne puisse s'y accumuler. Quant aux conducteurs à haute tension il vaut mieux qu'ils soient aériens, afin de ne jamais échapper à la surveillance.

On a vu, précédemment, que certaines des parties constitutives d'une sous-station (commutatrices, transformateurs, etc.) pouvaient atteindre des poids très élevés. Il sera donc bon de prévoir dans toute installation de cette nature un pont roulant d'une puissance appropriée.

En général les sous-stations s'établissent de plein pied (fig. 244). Mais, quand on ne dispose que d'un emplacement restreint, on peut mettre les transformateurs sur étage. Dans les sous-stations du chemin de fer métropolitain de New-York (Manhattan Railway), on a même installé un étage de plus, pour y loger une batterie-tampon (fig. 245).

Transformateurs tournants. — Pour transformer le courant triphasé à haute tension en courant continu à basse tension on peut également actionner, par un moteur à courant triphasé à haute tension, une génératrice à courant continu à basse tension.

On supprime ainsi les transformateurs statiques; mais, au lieu du convertisseur unique que constitue la commutatrice il faut, dans ce cas, un moteur et une génératrice. Or, si on se place au point de vue du prix de revient, une commutatrice et ses transformateurs reviennent moins cher qu'un moteur et une génératrice. Quant au rendement il sera un peu plus satisfaisant dans le

cas de la commutatrice, en raison du rendement élevé des transformateurs.

En revanche un groupe moteur et générateur devient à peu près indépendant des variations de voltage qui peuvent se produire sur la ligne primaire et en agissant sur l'excitation de la génératrice on peut assurer la constance du voltage sur la ligne à courant continu d'une façon parfaite.



Fig. 246. — Transformateur tournant Westinghouse de 600 kilowatts.

Nous donnons (fig. 246) la vue d'un transformateur tournant de 600 kilowatts, qui alimentait le chemin de fer de l'Exposition [1]. En avant se trouve la génératrice, qui pouvait donner 1 100 ampères à 550 volts. Le moteur, situé à l'arrière, est montré d'une façon plus complète par les figures 247, 248 et 249. C'était un moteur asynchrone, recevant directement du courant triphasé à 5 000 volts et 25 périodes. Sa vitesse était de



Fig. 247. — Moteur à 5000 volts du transformateur tournant.

[1] Ce transformateur tournant alimentait également la plate-forme roulante dont il sera parlé plus loin (voy. page 542).

290 tours et il actionnait la génératrice par un accouplement direct. Le démarrage s'effectuait très simplement en envoyant du courant continu dans la génératrice, qui fonctionnait alors comme moteur. Lorsque la vitesse de régime était atteinte, on coupait le courant continu et l'on branchait directement le moteur sur les 5 000 volts.

Le rendement du moteur était de 92 à 93 p. 100 et celui de la

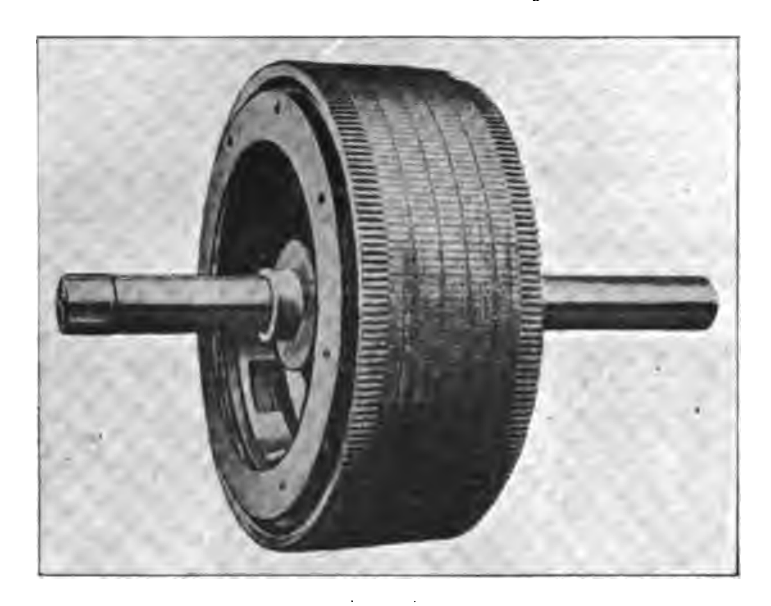


Fig. 248. — Rotor du moteur.

génératrice de 93 à 94 p. 100. Soit, en moyenne, un rendement total de 86,47 p. 100. Au contraire, avec une commutatrice, on aurait pu atteindre $0{,}96 \times 0{,}94 = 90$ p. 100.

Comme la sous-station ne disposait pas du courant continu nécessaire au démarrage, on avait installé, pour effectuer ce démarrage, sans occasionner d'effet inductif sur le réseau à haute tension, un groupe spécial, avec transformateurs statiques, moteur asynchrone et dynamo à courant continu. Les transformateurs

statiques, d'une puissance de 30 kilowatts, abaissaient la tension de 5 000 à 200 volts. Le moteur, à champ-tournant et à 4 pôles, actionnait directement une dynamo de 54, 6 ampères sous 550 volts. En agissant sur l'excitation de cette dynamo, on abaissait très sensiblement la tension initiale, en sorte que le démarrage du grand moteur ne comportait que des pertes ohmiques insignifiantes. Cette méthode de démarrage par la variation de l'excitation de l'excitatrice est susceptible, comme on le verra plus loin, d'être appliquée très heureusement à la traction des trains.



Fig. 249. — Stator du moteur.

La figure 250 représente un transformateur tournant analogue, quoique moins puissant, des ateliers d'Œrlikon. Il offre cette particularité qu'il est à *courants biphasés*, mais le type s'applique moyennant une simple modification de connexions à des courants triphasés (fig. 251). Le courant arrive au moteur biphasé (moteur asynchrone de 100 kilowatts) à la tension de 2300 volts; la vitesse de rotation est de 470 tours par minute : la génératrice, qui est actionnée par un manchon avec accouplement élastique, tourne à la même vitesse et produit du courant à 575 volts. Le démarrage du groupe se fait avec le courant biphasé lui-même et par insertion de résistances, méthode admissible en raison de la faible puissance du transformateur.

Transformation des courants alternatifs à haute tension en courants alternatifs à basse tension. — Les appareils permettant d'effectuer cette transformation ne sont autres que les

transformateurs statiques dont nous avons expliqué le principe et les propriétés, en parlant des commutatrices. Rien de plus simple, dans ce cas, qu'une sous-station de transformation. Nous en trouvons un exemple très typique, pour le cas des courants triphasés, dans les installations du chemin de fer de Thoune à Burgdorf. Le courant primaire arrive le long

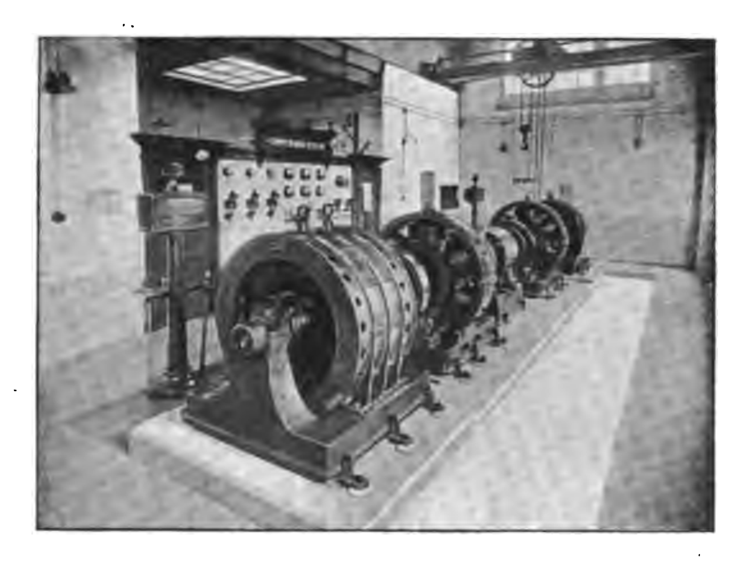


Fig. 250. — Transformateur tournant à courants biphasés des ateliers d'Œrlikon.

des voies, à la tension de 16 000 volts, par une canalisation aérienne. Tous les trois kilomètres environ et sur l'un des côtés de la voie sont installés les transformateurs, qui abaissent la tension à 750 volts. Ceux-ci sont placés dans une petite cabane en tôle, reposant sur une fondation en béton, dont le niveau est arasé à une cote telle que l'on peut facilement charger les transformateurs sur les wagons, ce qui est particulièrement commode pour le cas où l'on a à remplacer un transformateur avarié [1] (fig. 252).

[1] *Génie Civil.* Tome XL, n° II. — *Revue générale des chemins de fer*, septembre 1901.

Les transformateurs ont une puissance de 450 kilowatts; ils sont à trois noyaux et ont leurs enroulements primaires et secondaires connectés en étoile. Ils sont à bain d'huile et le bac, dans lequel ils sont plongés, est muni de nervures pour faciliter la dispersion de la chaleur.

Sur les trois bornes secondaires du transformateur une est

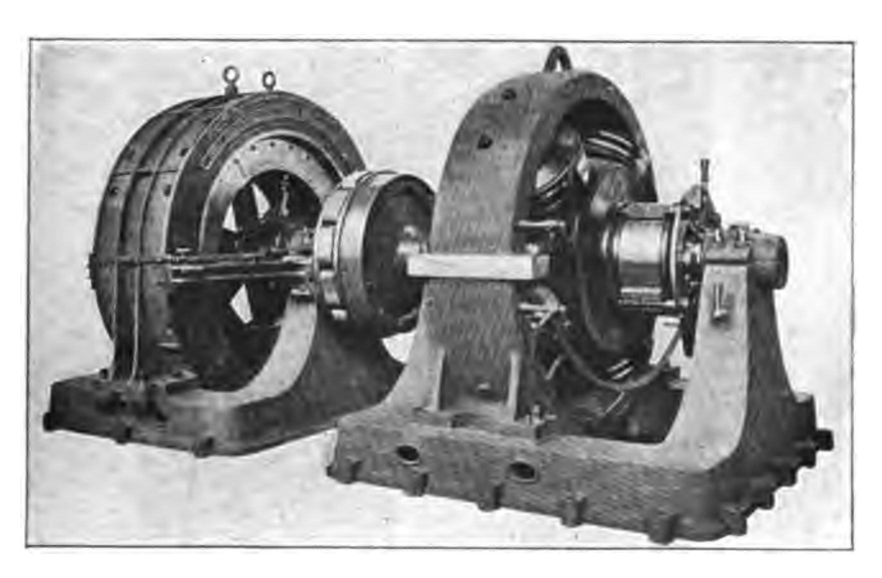


Fig. 251. — Transformateur tournant à courants triphasés des ateliers d'Œrlikon.

reliée aux rails par un fil de 8 millimètres de diamètre. Les deux autres servent de point de départ à une canalisation aérienne qui passe de l'autre côté des voies et se rend à un tableau de distribution, supporté par deux poteaux en bois, placés côte à côte (fig. 252 *bis*). Sur ce tableau se trouvent des interrupteurs, des coupe-circuits, un parafoudre et un compteur. La jonction du tableau avec les conducteurs aériens de la ligne se fait par des fils nus, la ligne étant alimentée à droite et à gauche, de part et d'autre d'un interrupteur de section situé justement sur la ligne, au point d'alimentation. Comme il y a un fil et un interrupteur pour chaque

côté de la ligne, on peut très facilement isoler l'un quelconque des conducteurs aériens.

La jonction des transformateurs avec la ligne primaire se

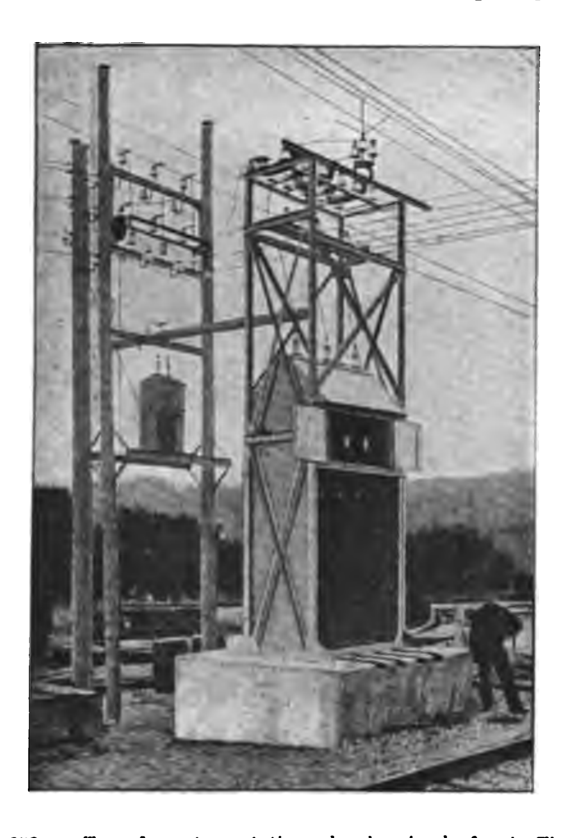


Fig. 252. — Transformateur statique du chemin de fer de Thoune à Burgdorf.

fait aériennement par 3 fils, au départ desquels sont intercalés 3 interrupteurs primaires. Ces fils montent verticalement jusqu'à des isolateurs fixés sur une charpente métallique surmontant la baraque des transformateurs, puis ils rejoignent horizontalement un double cours de poteaux en bois sur lesquels la jonction

avec la ligne à 16 000 volts est établie. Cette jonction est commandée par un interrupteur tri-polaire que l'on peut manœuvrer

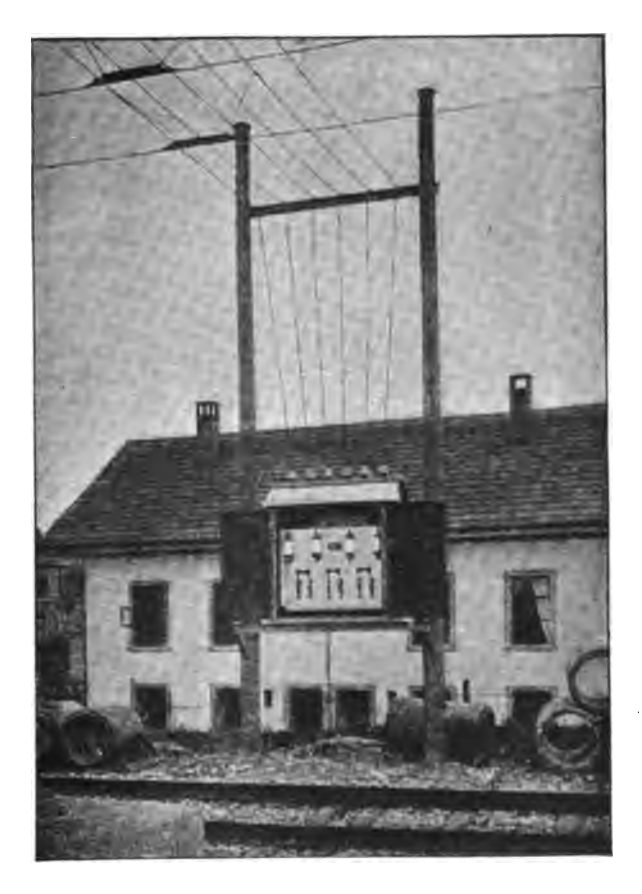


Fig. 252 *bis*. — Tableau de distribution à la sortie des transformateurs.

en mettant en mouvement un petit treuil situé dans une armoire fermée à clef. On a ainsi la possibilité d'isoler complètement, pour la visite et les réparations, tout l'appareillage de transformation (fig. 253).

Les lignes primaires étant aériennes, on a installé au-dessus

des transformateurs, des parafoudres à corne. Nous reviendrons,

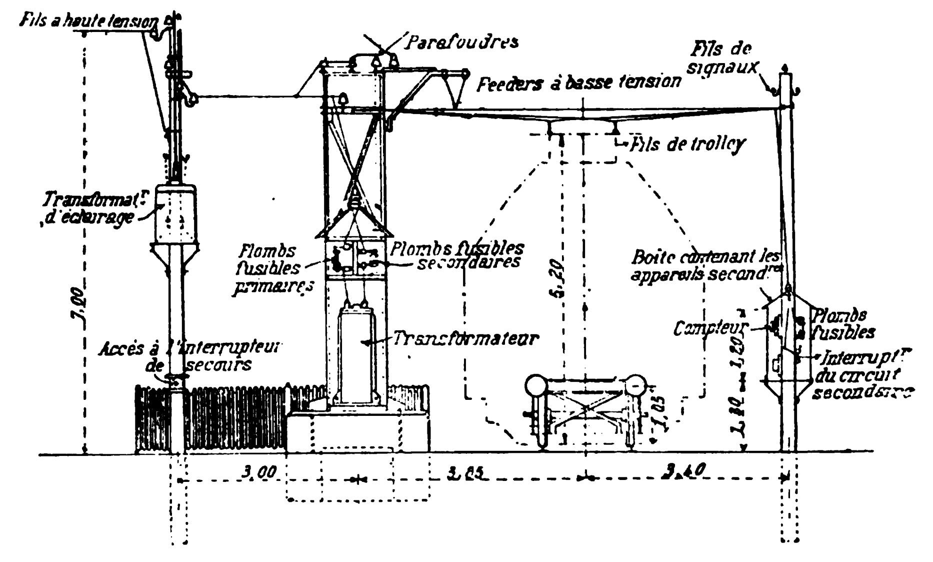


Fig. 253. — Chemin de fer de Thoune à Burgdorf. Ensemble d'un poste de transformation.

dans un paragraphe spécial, sur le fonctionnement de ces appareils.

Transformation des courants alternatifs à très haute tension en courants alternatifs à haute tension. — On trouve un exemple de cette transformation sur le chemin de fer à courants triphasés directs de la Valteline. Le courant primaire est produit, à la tension de 20 000 volts, dans une usine centrale hydro-électrique, à Morbegno. La ligne de distribution étant à 3 000 volts, l'abaissement de voltage du courant primaire se fait dans des sous-stations placées tous les 10 kilomètres, en moyenne, par des transformateurs statiques de 300 kilowatts. Les sous-stations se réduisent à un petit bâtiment en maçonnerie contenant les transformateurs. Tous les appareils de manœuvre, aussi bien de la ligne primaire

que de la ligne secondaire, sont situés dans ce bâtiment. Il renferme également un petit ventilateur actionné par un moteur asynchrone et qui sert pour le refroidissement des transformateurs.

Alimentation par double transformation. — Comme nous venons de le voir, on peut considérer, comme parfaitement résolu, le problème de la transformation du courant à haute tension, en courant approprié à la traction sur les chemins de fer.

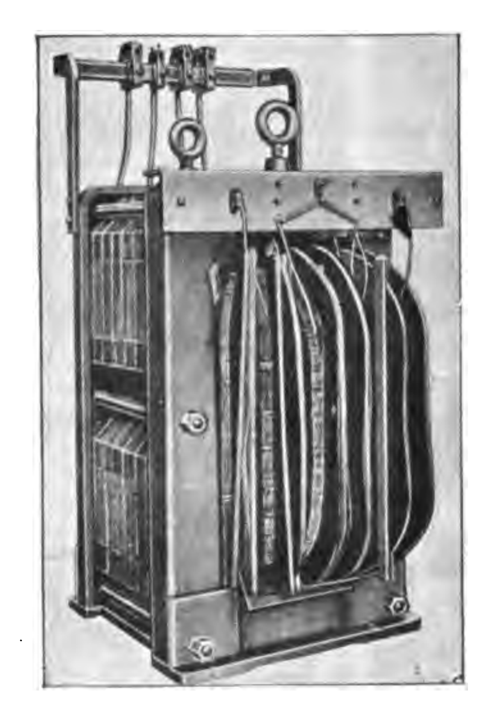


Fig. 254. — Transformateur à très haute tension Westinghouse.

On s'est demandé, dans certains cas, s'il n'était pas convenable d'envisager à l'usine une transformation analogue, d'abord pour éviter de produire directement du courant à haute tension; ensuite pour modifier la nature même du courant en vue de son transport à distance, circonstance qui peut se présenter, par exemple, quand le transport de force n'est que l'accessoire et que l'usine sert principalement pour une distribution à basse tension.

En ce qui concerne la tension de la production nous avons déjà fait connaître que l'on était arrivé à produire directement des courants triphasés à 20 000 volts (chemin de fer de la Valteline). Mais il est clair qu'une machine à 20 000 volts ne peut se manœuvrer qu'avec une certaine circonspection et que le nettoyage et

l'entretien d'un tableau de distribution écoulant des tensions aussi élevées nécessite un ensemble de précautions souvent gênantes, quand il faut aller vite ou qu'un accident s'est produit. Ne vaudrait-il pas mieux, dans ce cas, produire le courant à basse tension et élever sa tension seulement à la sortie de l'usine en le

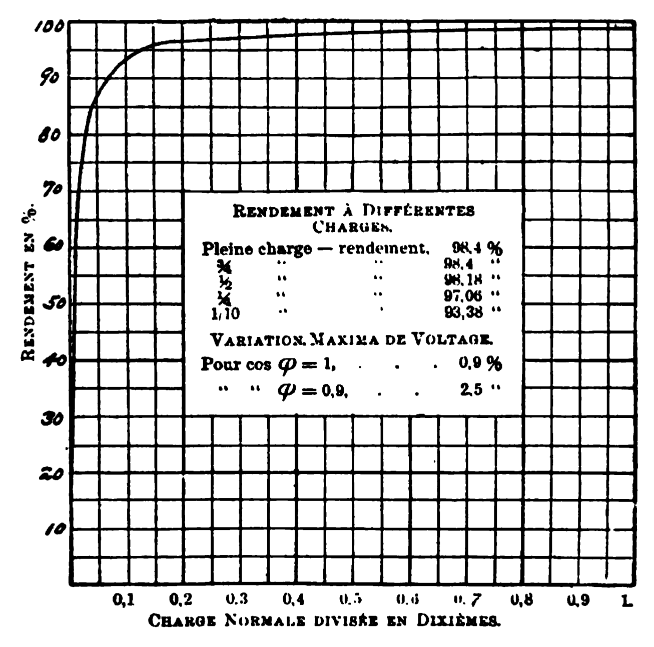


Fig. 255. — Courbe de rendement d'un transformateur statique.

faisant passer dans des transformateurs statiques (fig. 254) ? Ces transformateurs seraient placés dans un local spécial, fermé à clef et dans l'usine même, machines et appareils ne seraient parcourus que par des courants à basse tension. Si l'avantage d'une telle division est évident on voit, en revanche, que le rendement de la distribution sera un peu diminué, puisqu'il faudra compter avec le rendement du transformateur. Mais, comme le montre la figure 255, le rendement de ces appareils est extrêmement élevé (jusqu'à 98,4 p. 100). D'autre part, ils ne nécessitent aucune sur-

veillance spéciale. Il semble donc que l'on devra souvent prendre en considération une telle transformation qui s'imposerait, en tout cas, si l'usine avait un caractère mixte.

Supposons, de plus, que cette usine soit à courant continu, comme par exemple une usine d'alimentation directe et qu'il s'agisse d'effectuer avec le courant qu'elle produit un transport de force à distance. Au point de vue du cuivre à immobiliser dans la canalisation et des commodités de la transformation à l'arrivée sur la ligne, les courants triphasés à haute tension seront les plus avantageux. Il s'agira donc de passer, à l'usine, du courant continu au courant triphasé. La *commutatrice*, en raison de son double fonctionnement, permettra très facilement cette première transformation. Si on lui envoie du courant continu à 600 volts elle restituera du courant triphasé à 367 volts et il suffira, ensuite, d'élever cette dernière tension par des transformateurs statiques. Cependant il faut remarquer que la commutatrice, ainsi envisagée, ne fonctionne plus comme un moteur synchrone et que sa vitesse et par suite la fréquence du courant triphasé peuvent subir des variations assez importantes. A défaut, un groupe moteur-générateur donnera une solution très satisfaisante du problème [1].

Les *transformateurs redresseurs* de M. Maurice Leblanc permettent également d'effectuer toutes les transformations que l'on voudra réaliser, en se plaçant au point de vue spécial envisagé. Ils se prêtent parfaitement à la transformation des courants alternatifs à haute tension en courant continu à basse tension. Mais ils n'ont pas été employés, jusqu'ici, pour alimenter une ligne de traction, proprement dite [2].

[1] Société Internationale des électriciens. Juin 1902. — Communication de M. de Marchena.

[2] Voir, à ce sujet, le *Bulletin de la Société Internationale des Electriciens* de juin 1899.

La Cie du Chemin de fer du Nord emploie un très grand nombre de *transformateurs-redesseurs* Leblanc ; mais elle s'en sert surtout pour l'éclairage des gares.

Jonction des sous-stations aux usines génératrices. — Ces jonctions se feront par des lignes *souterraines* ou *aériennes*.

Les premières sont très coûteuses et ne s'imposeront guère que si l'on a à traverser des parties de voie très encombrées ou des

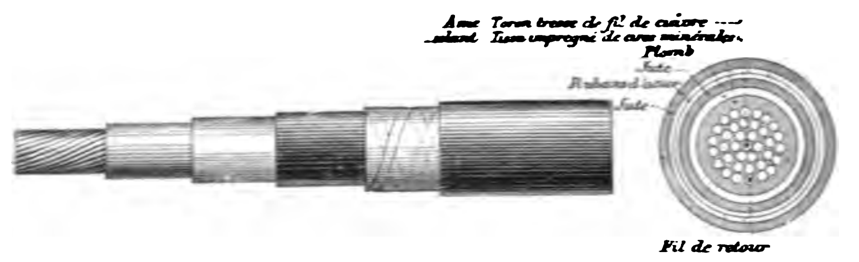


Fig. 256. — Type de câble armé.

agglomérations. Il est d'ailleurs à remarquer qu'un chemin de fer se trouve généralement dans une situation favorable pour établir économiquement ses lignes de transport, car il dispose d'une plate-forme indépendante.

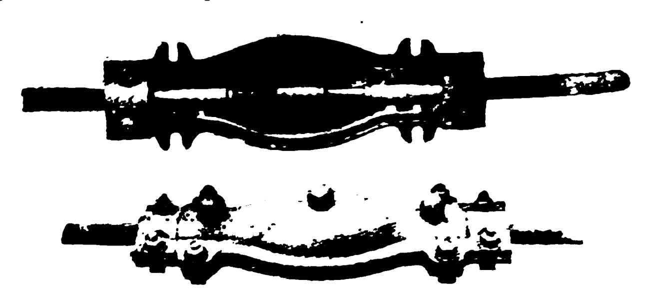


Fig. 257. — Boite de jonction pour câbles armés.

Lorsque les lignes doivent être souterraines, le mieux est de les constituer par des câbles armés et isolés (fig. 256). Un câble armé et isolé a, en principe, la constitution suivante : une âme en fils de cuivre, une couche périphérique isolante, une enveloppe en plomb, mettant l'isolant à l'abri de l'eau, un entourage en chanvre ou jute, une armature en fils de fer ou en ruban

d'acier, serrant le tout, par-dessus la couche précédente qui forme matelas et empêche la déformation de l'enveloppe en plomb, et enfin, par-dessus l'armature et pour la protéger contre l'oxydation, une enveloppe en chanvre goudronné. Un tel câble peut se conserver pendant de longues années dans le sol, surtout si l'on prend soin de le placer dans une couche de sable qui le protège mécaniquement et chimiquement.

Fig. 258. — Câbles à trois conducteurs pour courants triphasés.

Les câbles de cette nature étant livrés par bobines dont la longueur dépasse rarement 150 mètres il faut, au moment de la pose, jonctionner entre elles les diverses sections. On se sert, à cet effet, de boîtes de jonction en fonte, dans lesquelles les extrémités des câbles sont réunies par des brides ou des manchons



Fig. 259. — Boîte de jonction pour câbles à trois conducteurs.

(fig. 257). On coule ensuite, dans l'intérieur, de la matière isolante.

Quand on a à transporter du courant alternatif il faut se préoccuper d'éviter les actions inductives que pourraient exercer les variations du courant sur l'enveloppe protectrice en acier.

Aussi prend-on, alors, des câbles concentriques, c'est-à-dire que

l'on réunit dans un même câble le câble d'aller et le câble de retour, ceux-ci étant placés concentriquement, de manière à ce que leurs actions inductives s'annulent.

Dans un même ordre d'idées, quand on aura à transporter des courants triphasés, on fera usage de câble à trois conducteurs (fig. 258). Leur jonction se fera comme l'indique la figure 259. Si la canalisation est un peu étendue on disposera, de distance en distance, des *boîtes de coupure*, qui permettront d'isoler telle ou telle partie des câbles (fig. 260). Ces boîtes sont munies d'interrupteurs à main, formant coupe-circuit. Aux extrémités de la canalisation les câbles seront terminés, comme l'indique la figure 261, par des *capots d'extrémité*.



Boîte complète.



Vue en plan, avec couvercle enlevé.

Fig. 260. — Boîte de coupure pour câbles à trois conducteurs.

Lorsque, dans une même direction, on a à placer un grand nombre de câbles, on peut faire la dépense soit d'une galerie, soit d'un caniveau et se dispenser, alors, d'armer les câbles. C'est ainsi que l'on a opéré pour le chemin de fer élevé de New-York. Les

câbles pour courants triphasés 11 000 volts, contiennent trois torons en cuivre de 13 millimètres de diamètre fortement isolés et placés en triangle. L'espace existant entre les câbles est rempli de jute et une nouvelle couche isolante enveloppe le tout circulairement (fig. 258). Par-dessus cette dernière couche règne une gaine en plomb formant enveloppe étanche. Le diamètre extérieur du câble, ainsi constitué, est de 76 millimètres. Son poids est de 14 kilogrammes par mètre courant. Chaque câble est placé dans un petit tuyau en terre vitrifiée à parois rectangulaires (ce qui facilite l'empilage) et dont l'intérieur est cylindrique, d'un diamètre un peu supérieur à celui du câble (fig. 262). Les tuyaux sont jointoyés bout à bout au mortier de ciment. On réunit jusqu'à 35 tuyaux dans une même tranchée et on les englobe, d'autre part, dans un massif protecteur en béton. Tous les 120 mètres, des regards sont ménagés aussi bien pour assurer la jonction des câbles que pour permettre de retirer un câble avarié et de le remplacer, sans ouvrir de tranchée.



Fig. 261. — Capot d'extrémité pour câbles à trois conducteurs.

Les câbles isolés, qu'ils soient armés ou non, ont l'inconvénient de ne pouvoir supporter des débits aussi intenses que des câbles nus. C'est ainsi que l'on recommande de ne pas faire débiter aux gros câbles plus de 1 ampère par millimètre carré de cuivre, alors qu'avec les câbles nus on peut aller jusqu'à 5 ou 6 ampères.

D'autre part en raison de leur poids et de leurs dimensions, ils arrivent rapidement à être peu maniables. Enfin, sans compter qu'ils coûtent très cher, ce n'est que très rarement qu'ils sont fabriqués pour pouvoir supporter plus de 11 à 12 000 volts.

Aussi, dès qu'on le pourra, ou dès que la tension du courant sera trop élevée pour pouvoir être admise dans des canalisations souterraines, devra-t-on avoir recours à des conducteurs nus,

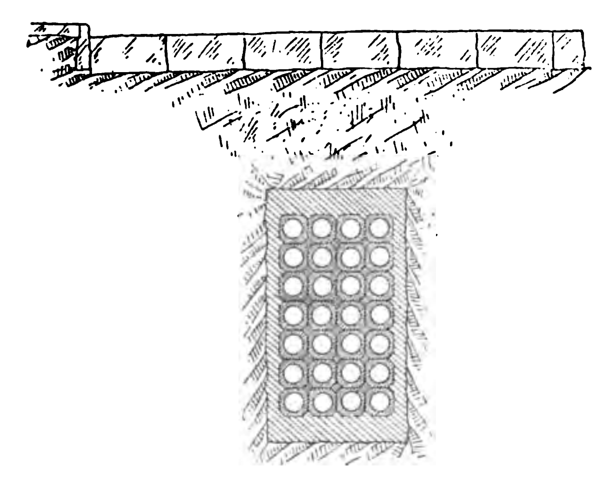


Fig. 262. — Conduits en terre vitrifiée pour câbles souterrains (Manhattan railway).

montés extérieurement, sur isolateurs. L'emploi de très hautes tensions permettra d'ailleurs l'adoption de conducteurs de faible section, ce qui sera une double économie, d'abord au point de vue du cuivre et ensuite relativement aux supports qui pourront être assez espacés.

Il ne faudrait pas croire, cependant, que la distribution des hautes tensions par conducteurs aériens soit toujours très facile. D'abord il faut se préoccuper de la chute possible d'un conducteur sur le sol. Ensuite, quand on a affaire à des canalisations comportant des conducteurs à des potentiels très différents (comme une ligne triphasée), il peut se produire des courts circuits très

intenses soit par suite de la chute de branches d'arbres sur les conducteurs, soit même, plus simplement, que de gros oiseaux viennent heurter de leurs ailes deux des fils de la canalisation. Si le dernier accident n'est pas commun, le premier est au contraire assez fréquent, à moins que l'on ne procède à des élagages ou même à l'enlèvement radical des arbres trop voisins de la canalisation.

Parmi les avantages que M. Thury fait valoir en faveur de son système de distribution en série, un des plus importants est justement celui de ne nécessiter qu'un conducteur unique, soit que la canalisation soit établie en boucle, soit que l'on mette l'extrémité de la ligne à la terre, le courant revenant alors à l'usine par le sol. Des expériences faites entre Martigny et Lausanne (56 kilomètres, courant à 23 000 volts) ont montré que le retour par la terre était parfaitement réalisable, même pour une ligne aussi longue [1].

Avec des courants triphasés, 3 conducteurs au moins sont nécessaires. Si le débit à écouler est élevé, plutôt que de prendre 3 conducteurs d'assez gros diamètre, ce qui obligerait à rapprocher les poteaux et à renforcer les isolateurs, on aura intérêt à dédoubler la canalisation.

Afin de diminuer les effets d'inductance, on placera les 3 fils en triangle. L'écartement des fils, leur diamètre devront faire l'objet de calculs assez compliqués, dont l'exposition ne rentre pas dans le cadre de cet ouvrage et qui ne sont pas d'ailleurs spéciaux aux lignes électriques alimentant des chemins de fer.

Les isolateurs constituent toujours un point faible dans une canalisation. A ce point de vue il y a donc également intérêt à espacer les supports. Il faut en outre remarquer que tel isolateur qui conviendra pour une région à climat sec deviendra insuffisant dans un pays humide et à brouillards fréquents. Cela revient

[1] Alors qu'avec deux fils (un pour l'aller et l'autre pour le retour) la résistance d'isolement est de 13 ohms, elle s'abaisse à 8 ohms quand on forme le circuit par l'un des fils et la terre.

à dire que les transports de force à très haute tension ne sont pas partout possibles. Mais on a fait assez de progrès dans la fabrication des isolateurs pour que, même dans des conditions peu favorables, on puisse encore envisager avec sécurité des distributions à 30 000 volts.

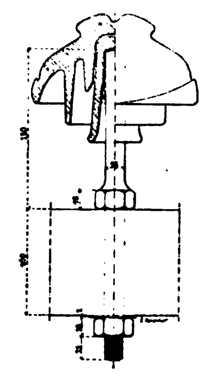


Fig. 263. — Isolateur pour courant à haute tension du chemin de fer de Milan à Varèse.

Les isolateurs le plus fréquemment employés sont en porcelaine, à double ou triple cloche, de manière à ce que les déperditions superficielles qui pourraient être provoquées par l'humidité soient à peu près annulées. Si la tension est élevée, chaque isolateur devra être soigneusement essayé, avant emploi, à une tension triple ou quadruple de la tension de la ligne.

La figure 263 montre le type d'isolateur adopté pour la ligne

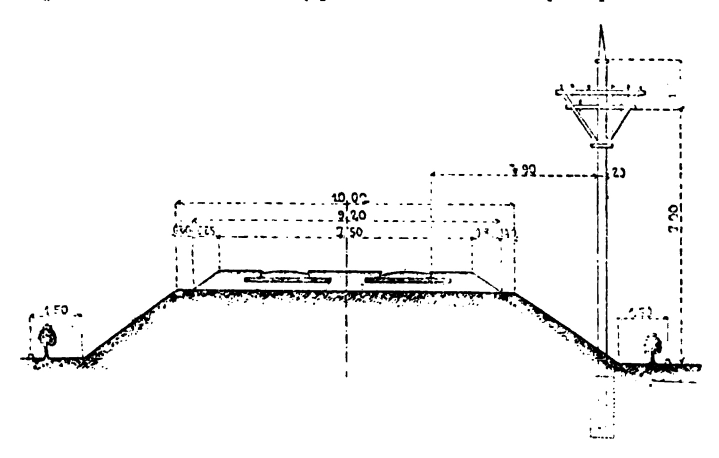


Fig. 264. — Ligne à haute tension du chemin de fer de Milan à Varèse.

d'alimentation des sous-stations du chemin de fer de Milan à Varèse. Le courant triphasé à 12 000 volts est amené à la sous-station par deux lignes à 3 fils montés en triangle sur des

poteaux en bois, placés le long des voies (fig. 264). Les fils sont en cuivre et ont, selon les distances, des diamètres de 9 millimètres, 6 millimètres et 4 millimètres. La conductibilité du cuivre employé atteint 98 p. 100 de celle du cuivre chimiquement pur. Sa résistance mécanique à la rupture est de 30 kilogrammes par millimètre carré. L'espacement des poteaux est de

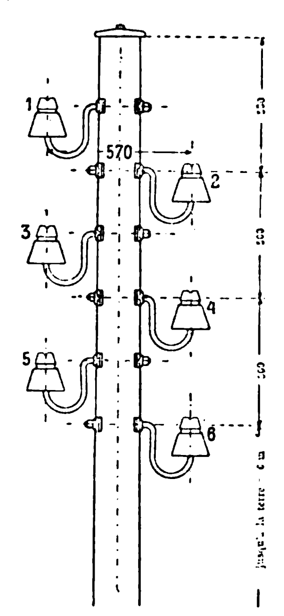
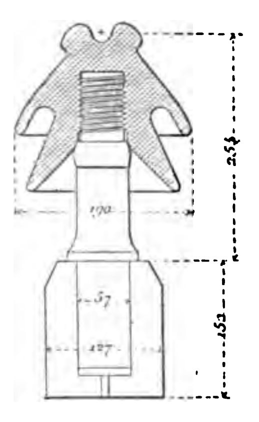


Fig. 265. — Double ligne triphasée du chemin de fer de Thoune à Burgdorf.


Fig. 267. — Isolateur de la ligne à haute tension du chemin de Thoune à Burgdorf.

50 mètres. Chaque poteau est surmonté d'un chapeau en fonte, dans la tête duquel est planté un paratonnerre relié à la terre par un fil de fer de 5 millimètres de diamètre.

Le rendement de la canalisation est de 92 p. 100.

Sur la ligne Thoune à Burgdorf la canalisation triphasée à 16 000 volts est constituée par des fils de cuivre de 5 millimètres de diamètre, montés comme l'indique la figure 265. Cette figure comporte 2 lignes triphasées, l'une d'elles servant pour le chemin de fer et l'autre alimentant la ville de Berthoud. Les poteaux sont en sapin imprégné de chlorure de zinc. Leur distance est de 45 à 50 mètres. Ils ont 8 mètres et la flèche donnée à la cana-

lisation est telle que les fils se trouvent aux points bas, à 6 mètres au moins au-dessus du sol.

Les isolateurs sont en porcelaine bien vitrifiée et sont, pour cette raison, peu hygroscopiques. La double cloche intérieure s'oppose en outre aux déperditions d'électricité soit par l'humidité, soit par les poussières (fig. 267).



Fig. 268. — Isolateur pour courant à 20 000 volts, du chemin de fer de la Valteline.

Le rendement de la canalisation est de 95 p. 100.

L'isolateur représenté par la figure 268 est celui qui a été employé sur la ligne primaire (20 000 volts) du chemin de fer de la Valteline. Cet isolateur est en porcelaine. On a, comme on le voit, multiplié les redans, de manière à augmenter la résistance effective de l'isolateur.

Dans les divers isolateurs que nous venons de passer en revue l'isolation est obtenue par la porcelaine seule, à l'exclusion de l'huile, que l'on employait cependant couramment, au début des transports de force. Dans ce cas on relevait intérieurement l'isolateur de manière à former une petite cuvette dans laquelle l'huile était déposée. L'expérience a prouvé que l'on pouvait s'éviter cette complication doublement ennuyeuse, d'abord au point de vue de l'établissement même de la ligne, ensuite relativement à son entretien.

Étant donnée l'indépendance de la plate-forme d'un chemin de fer, on pourra presque toujours avoir recours pour supporter la ligne à des poteaux en bois[1]. Ceux-ci seront injectés et reposeront sur une fondation, car si le bois suffit en tant que support il faut que la solidité de la ligne ne laisse jamais à désirer. Souvent on pourra même placer les fils à haute tension sur les poteaux de la ligne de distribution.

[1] C'est un point très important. Sur la ligne de Thoune à Burgdorf, par exemple, où l'imprégnation des poteaux n'a pas été faite, d'une façon très heureuse, on doit, maintenant, remplacer annuellement un grand nombre de poteaux.

Les poteaux en fer ou en charpente ne conviendront guère que pour les lignes n'empruntant pas la plate-forme du chemin de fer et ayant à traverser des centres habités. On en trouvera des types très bien étudiés dans les transports de force existants (Milan à Paderno, lignes de la région de Grenoble etc...)



Fig. 269. — Parafoudre à cornes (ligne triphasée).

Une ligne aérienne un peu longue est très facilement sensible aux décharges atmosphériques et, pour qu'elle apporte un trouble profond dans les usines et les sous-stations, il n'est pas obligatoire qu'elle soit frappée par la foudre. Des éclairs jaillissant à 1 et même 2 kilomètres peuvent très bien influencer la ligne et lui donner un potentiel très élevé. Pour éviter que les machines ne soient détériorées par le courant qui en résulte il y a donc des précautions indispensables à prendre. Celles-ci consistent à munir la ligne, en des points déterminés, de parafoudres.



Fig. 270. — Mode de fonctionnement d'un parafoudre.

Mais plus la tension des lignes primaires est élevée et plus

l'installation des parafoudres devient difficile, car le courant aura tendance à s'écouler par les parafoudres eux-mêmes. Et, en tout cas, quand ils auront fonctionné, un arc très intense s'établira entre les deux conducteurs du parafoudre. Dans les *parafoudres à cornes* (fig. 269), cet arc s'éteindra de lui-même, car la chaleur

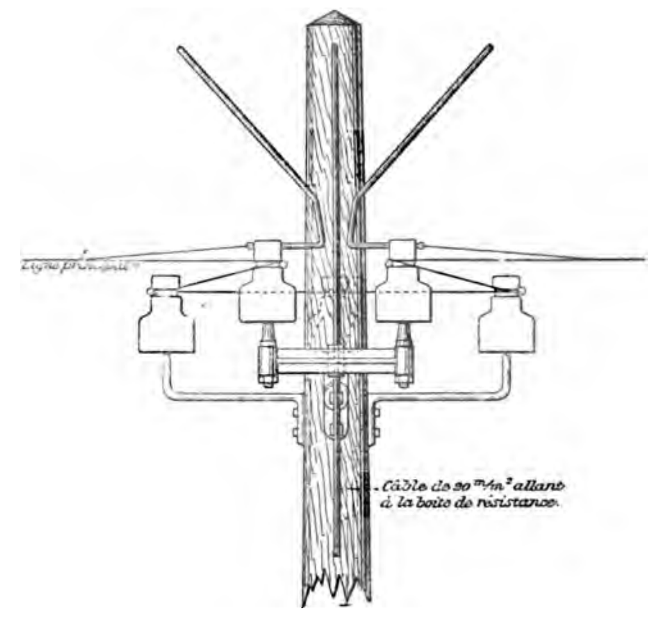


Fig. 271. — Parafoudre à trois cornes.

développée tendra à le faire monter le long des cornes et il arrivera un moment où son écartement sera tel qu'il ne pourra se maintenir (fig. 270). On obtient d'excellents résultats avec des parafoudres à trois cornes qui protègent la ligne dans les deux sens (fig. 271). La corne médiane est reliée à une bonne terre, par exemple à une grande plaque de cuivre enfoncée dans un trou, où l'on pilonnera du coke humide.

Les parafoudres s'installent un peu en dehors des usines et des sous-stations. Pour mieux protéger ces installations il convient

d'intercaler encore entre elles et les parafoudres une *résistance inductive*, que les décharges occasionnées par les éclairs ne peuvent franchir qu'avec la plus grande difficulté [1].

Il ne paraît pas bien nécessaire de multiplier les parafoudres sur la ligne elle-même. En tout cas il faut bien se rappeler que le meilleur parafoudre ne sera efficace qu'autant qu'il n'aura pas de résistance inductive à vaincre et qu'il sera relié non pas seulement à une tige enfoncée dans le sol, mais à une terre beaucoup plus parfaite comme, par exemple, celle constituée ainsi qu'il a été indiqué plus haut.

Lorsque la canalisation est mixte (souterraine et aérienne) il est indispensable d'installer des parafoudres aux points de jonction. Il faut considérer, en effet, que les câbles souterrains constituent, avec leur isolant et leur armature en contact avec la terre, un véritable condensateur, tout à fait apte à absorber les décharges aériennes. Celles-ci, en s'écoulant par la terre, perceront l'isolant.

Emploi des accumulateurs dans les sous-stations. — Nous avons déjà exposé les raisons qui avaient conduit à installer des batteries d'accumulateurs dans les usines à courant continu, alimentant une ligne de chemin de fer, directement ou par feeders.

Lorsque l'alimentation est effectuée par les sous-stations les accumulateurs ne sont plus à leur place dans les usines ; d'abord parce que ces dernières, produisant généralement du courant alternatif, ne pourraient charger des accumulateurs. Ensuite, parce que les câbles primaires auraient néanmoins à supporter des régimes très variables et devraient être calculés pour le débit maximum.

[1] M. Dussaugey fait avec raison remarquer, dans le *Bulletin de la Société Internationale des Electriciens* (octobre 1902), que, dans les installations où il est fait usage de transformateurs statiques pour élever la tension au départ de la ligne et ensuite pour l'abaisser à l'entrée des sous-stations, ces appareils constituent une résistance inductive absolument parfaite. Il y voit un avantage précieux pour les transports de force effectués d'après cette méthode.

Avec des accumulateurs dans les sous-stations ce dernier inconvénient disparaît, le régime variable ne s'établissant qu'à la sortie de la sous-station.

Il est clair que, si l'on a affaire à un réseau pour lequel la consommation est sensiblement constante, des accumulateurs ne s'imposeront pas. Mais c'est là une circonstance exceptionnelle, ne se présentant guère que pour un réseau à profil peu accidenté et à très grand nombre de trains en service. En général la courbe de débit d'une sous-station différera énormément de l'horizontale et la batterie aura pour effet d'absorber de l'électricité, pendant les instants où la charge tombera au-dessous de la charge normale, et d'en restituer pour « faire les pointes » de la courbe.

Malheureusement, comme on l'a fait déjà remarquer, les accumulateurs ont l'inconvénient d'absorber de l'énergie et de nécessiter des dépenses d'entretien assez élevées. En sorte que l'on ne peut pas dire que, dans tous les cas, par exemple, quand l'électricité reviendra à très bon marché, ils seront d'un emploi très judicieux. Mais il ne faut pas oublier qu'ils ont le grand avantage de réduire la puissance à installer dans l'usine génératrice et qu'à ce titre ils pourront constituer un appoint fort précieux, même pour des installations hydrauliques, comportant des prix de revient extrêmement bas.

En fait, même dans les grandes installations américaines l'emploi de batteries d'accumulateurs dans les sous-stations de transformation est aujourd'hui chose courante. Cependant on ne pourrait poser, à ce point de vue, de règle absolue. Une étude devra être faite dans chaque cas, d'après les variations présumées ou réelles du régime de la consommation.

Le montage des accumulateurs dans les sous-stations de transformation ne diffère pas de celui qui doit être employé dans une usine. Par conséquent les accumulateurs seront montés en dérivation sur les barres du tableau, avec *survolteur* réglant automa-

tiquement la tension. On a cherché à supprimer le groupe survolteur, par l'emploi de *commutatrices survolteuses*. De même on a parfois monté des batteries sans survolteur. Mais dès qu'il s'agit d'une installation un peu importante on aura encore avantage à employer le groupe classique survolteur (moteurs et dynamo)[1].

[1] Voir page 92.

CHAPITRE VI

MOTEURS ÉLECTRIQUES POUR CHEMINS DE FER

Moteurs employés pour la traction des chemins de fer. Moteurs à courant continu avec excitation en série. Fonctionnement des moteurs-série. Manœuvre des moteurs-série. Appareils de manœuvre. Moteurs à courant continu avec excitation en dérivation. Moteurs à courant alternatifs monophasés. Moteurs à courant alternatifs polyphasés. Manœuvre des moteurs à courants polyphasés. Appareils de manœuvre.

Moteurs employés pour la traction des chemins de fer. — Un moteur électrique se compose de deux parties : une partie fixe dite *inducteur*, qui produit un champ magnétique, et une partie mobile, dite *induit*, qui tourne sous l'action du champ magnétique. Inducteur et induit sont alimentés par du courant provenant de la ligne de distribution. Lorsque l'alimentation est faite avec des courants polyphasés, les inducteurs produisent non un champ magnétique fixe, mais un *champ magnétique tournant* et c'est ce champ tournant qui provoque la rotation de l'induit. Celui-ci peut alors ne recevoir aucun courant de la ligne de distribution. Comme son fonctionnement est différent de celui d'un induit à courant continu, on le désigne généralement sous le nom de *rotor*, les inducteurs constituant, de leur côté, le *stator*.

Les *moteurs à courant continu* sont, de beaucoup, les plus répandus. Ils ne sont autres que des dynamos recevant du courant au lieu d'en produire. Dans ce cas, le champ magnétique créé par les inducteurs (champ fixe, naturellement) agit sur les bobines

de l'induit et tend à les faire tourner de manière à les placer dans la position où elles sont traversées par le flux maximum.

Etant constitués comme des dynamos, les moteurs à courant continu devront comporter un collecteur. C'est là le point faible de ce genre de moteurs. Inconvénient compensé, toutefois, par des avantages électriques et mécaniques de premier ordre.

On a été naturellement amené à combiner des moteurs très ramassés, afin de pouvoir les loger commodément sous les caisses des voitures automotrices. La forme qui est la plus convenable à ce point de vue est, pour les moteurs à courant continu, la forme *tétrapolaire*, c'est-à-dire à quatre pôles. Mais un moteur tétrapolaire, d'aussi faible encombrement, tourne à une assez grande vitesse, généralement plus grande que la vitesse normale des essieux. Il faut donc, pour attaquer ces essieux, un jeu d'engrenages. A cet effet le moteur est placé à côté de l'essieu et, par un pignon, il commande une roue dentée montée sur l'essieu (fig. 272). Le rapport d'engrenage varie selon la puissance et selon la vitesse que l'on veut obtenir. Souvent il est aux environs de 3, c'est-à-dire que le pignon comprend trois fois moins de dents que l'engrenage monté sur l'essieu, ou encore que le pignon tournera trois fois plus vite que l'essieu.

Les engrenages entraînant une perte d'énergie, on a combiné des moteurs à vitesse réduite qui se montent directement sur les essieux. Mais, généralement, on réserve ces moteurs spéciaux pour les locomotives (voy. chapitre IX), celles-ci permettant l'emploi de moteurs plus volumineux que dans le cas des automotrices et à vitesse de rotation par conséquent moins considérable.

Un *moteur à courants polyphasés* est plus simple qu'un moteur à courant continu, n'ayant pas de collecteur (voy. plus loin). Mais il ne possède pas, au même degré, les avantages merveilleux qui ont fait la fortune du moteur à courant continu. En particulier, il développe, au démarrage, un couple moindre. De plus il comporte un facteur de puissance ($\cos \varphi$) assez élevé, qui réduit la

puissance apparente absorbée. Dans la pratique on emploie surtout des *moteurs à courants triphasés* qui sont commodes, non seulement par eux-mêmes, mais aussi au point de vue de la distribution qui peut leur être appliquée (Thoune à Burgdorf, Jungfrau, Gornergrat etc.).

Tout récemment encore les *moteurs à courant alternatif simple* étaient considérés comme impropres à la traction, ne pouvant

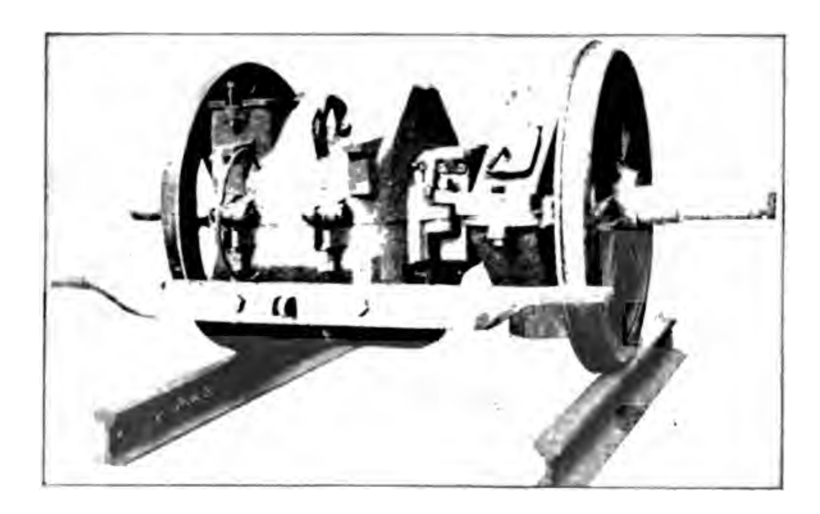


Fig. 272. — Attaque de l'essieu par engrenages.

démarrer sous charge. Mais la Cie Westinghouse vient d'appliquer sur la ligne d'Annapolis, comme il a été dit précédemment, un moteur nouveau, jouissant de cette propriété remarquable de se comporter à peu près comme un moteur à courant continu.

Dans un autre ordre d'idée, nous devons signaler la tendance de plus en plus marquée qui se manifeste en faveur de l'alimentation des moteurs par des courants à tension élevée.

A la vérité, les moteurs à courant continu restent toujours à 6 ou 700 volts, le collecteur se prêtant peu à l'utilisation de tensions plus élevées ; mais, avec les courants triphasés, on a atteint

3 000 volts (chemin de fer de la Valteline) et 10 000 volts (ligne d'expériences de Berlin à Zossen). Nous avons déjà parlé de l'intérêt que présentaient de tels systèmes de distribution. On en diminue d'ailleurs le danger en agissant, pour les différentes manœuvres que l'on a à effectuer, non sur le courant du *stator* c'est-à-dire sur le courant à haute tension, mais sur le courant du *rotor*, courant que produit, par induction, le *stator* et dont la tension est beaucoup plus faible (3 à 400 volts).

Moteurs à courant continu avec excitation en série. — Ces moteurs sont, de beaucoup, les plus répandus. Les tramways marchent à peu près exclusivement avec des moteurs de ce système et l'on a eu une tendance bien compréhensible à en généraliser l'emploi, quand on a voulu appliquer l'électricité à la traction des chemins de fer.

Dans un moteur avec excitation en série, c'est le même courant I qui traverse les inducteurs et l'induit. Comme ce courant est normalement très intense, les enroulements des moteurs peuvent être constitués par des conducteurs de gros diamètre, ce qui diminue le prix de la fabrication et facilite les réparations. Les inducteurs sont montés sur la carcasse même et comme celle-ci se compose, le plus souvent, de deux parties réunies par une charnière, on peut très facilement visiter tout l'intérieur du moteur (fig. 273 et 274). L'inspection du collecteur, qui doit être faite plus fréquemment, a lieu par une ouverture ménagée dans la partie supérieure de la carcasse (fig. 275) et que l'on atteint facilement, dans le cas des voitures automotrices, en ouvrant une petite trappe ménagée dans le plancher de la voiture.

Il n'entre pas dans le cadre de cet ouvrage de décrire tous les détails de construction des moteurs électriques excités en série. C'est aujourd'hui un type courant et de nombreuses maisons de construction en fabriquent d'excellents. Nous appellerons seulement l'attention sur les points suivants :

Il est indispensable que l'huile ne puisse s'introduire dans l'intérieur de la carcasse du moteur ; les induits doivent être soigneusement frettés, des coups de feu et d'autres avaries pouvant se

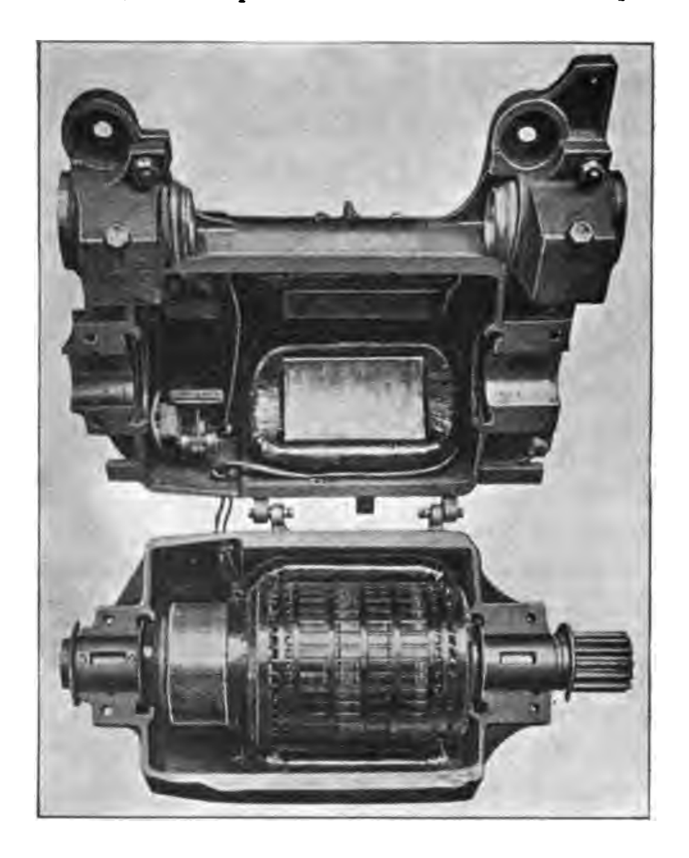


Fig. 273. — Moteur-série pour chemin de fer, ouvert.

produire, en cas de défrettage. Les paliers seront combinés pour une faible usure, car, sans cela, l'induit s'abaisserait et pourrait venir toucher les inducteurs. Le collecteur est souvent fait par économie, avec un nombre de lames isolées trop faible ; l'inconvénient est que la différence de tension entre les lames est trop

grande et il se produit alors de fortes étincelles, au moment de la commutation. Le pignon, s'il en existe un, doit être extrêmement résistant. On le fait généralement en acier taillé à la fraise. La roue dentée, montée sur l'essieu, est alors en

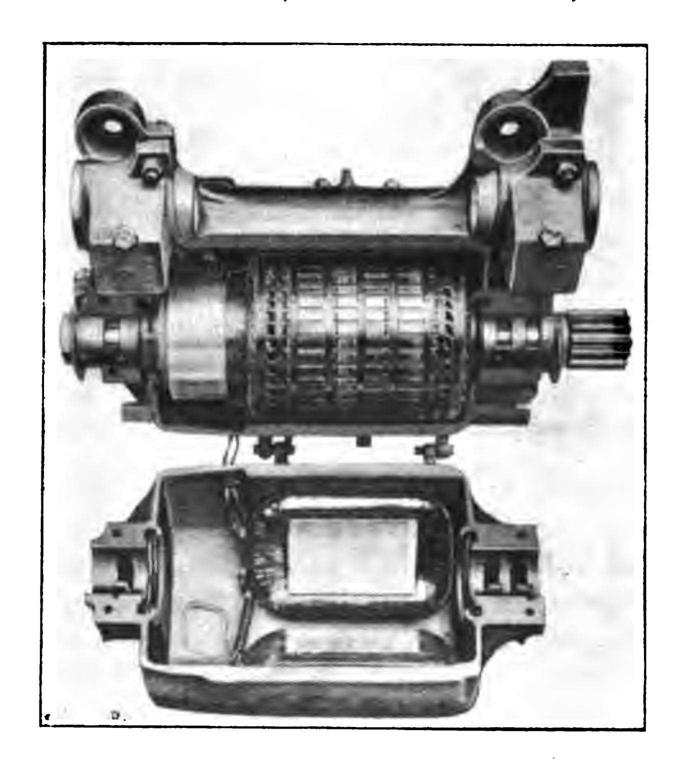


Fig. 274. — Moteur-série pour chemin de fer, ouvert, l'induit restant en place.

acier coulé et l'engrènement a lieu dans un *carter*, rempli d'huile.

Un moteur de chemin de fer, ayant généralement à effectuer un service prolongé, doit pouvoir supporter, sans le moindre inconvénient, l'élévation de température produite par le courant. Mais, d'autre part, il ne faut pas que cette température soit trop élevée et, généralement, on demande qu'elle ne soit pas supé-

rieure d'une cinquantaine de degrés à la température ambiante.

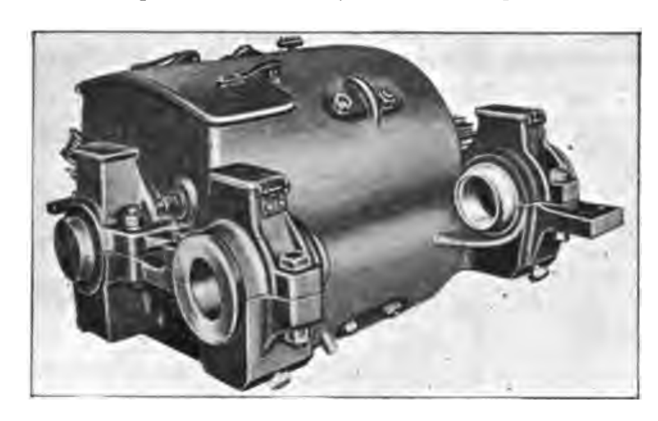


Fig. 275. — Moteur-série pour chemin de fer, dans sa carcasse.

Les surfaces de refroidissement et la ventilation devront être prévues en conséquence.

Fonctionnement des moteurs-série. — Dans un moteur en mouvement il se produit, comme dans une dynamo et, par le seul fait de la rotation de l'induit dans un champ magnétique, une certaine force électromotrice e. Elle est opposée à celle du courant qui fait tourner le moteur (Loi de Lenz) et est, pour cette raison, nommée *force contre-électromotrice*. Soient E la tension du courant d'alimentation (en volts), R la résistance intérieure du moteur (en ohms) et I l'intensité du courant (en ampères) qui traverse à la fois l'induit et les inducteurs (fig. 276). On aura :

$$I = \frac{E - e}{R} \qquad (1)$$

Or le régime de e est connu. Il est exprimé par la relation

$$e = K n \varphi \qquad (2)$$

dans laquelle K est une constante, n le nombre de tours par seconde de l'induit (et par suite du moteur) et φ le flux magnétique produit par les inducteurs.

En rapprochant les formules (1) et (2) on voit qu'au moment du démarrage e est nul et I maximum. A ce moment $I = \frac{E}{R}$. Cette valeur est généralement beaucoup trop forte pour pouvoir être supportée par le moteur, qui risquerait de brûler. On la réduit en augmentant R artificiellement, par des *résistances*, que l'on insère sur le circuit d'alimentation.

Le moteur se met en route ; la force contre-électromotrice croît

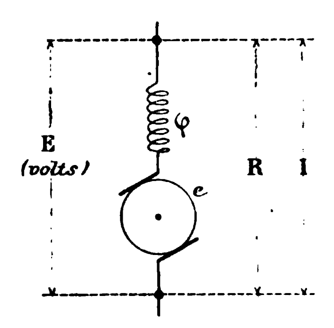


Fig. 276. — Schéma d'alimentation d'un moteur-série.

Fig. 277. — Courbe du flux en fonction de l'intensité.

rapidement et tend à diminuer I. On pourra donc, concurremment, diminuer la résistance, et on la supprimera totalement, dès que le moteur aura atteint sa vitesse.

Sur l'arbre de l'induit, c'est-à-dire sur l'arbre du moteur, un certain couple mécanique C va se manifester. La puissance disponible sera $C \times 2\pi n$ et comme elle est, d'autre part, égale à eI on aura :

$$C = \frac{e\,I}{2\,\pi\,n} \qquad (3)$$

formule qui permet de calculer, à chaque instant, le couple mécanique.

On peut mettre cette formule sous la forme :

$$C = \frac{K\,n\,\varphi\,I}{2\,\pi\,n} = \frac{K}{2\pi}\,\varphi\,I \qquad (4)$$

Or le flux magnétique, φ, produit par le courant circulant dans les fils des inducteurs est fonction de ce courant. On peut le représenter graphiquement par la courbe de la figure 277, dans laquelle les ordonnées représentent les différentes valeurs du flux et les abscisses les intensités variables du courant. On voit que φ croît d'abord proportionnellement à I; puis il arrive un moment où les inducteurs sont *saturés* et la courbe se rapproche de l'horizontale, en formant un *coude* tout à fait caractéristique. A partir de ce moment φ sera donc sensiblement constant.

Or, les moteurs-série, généralement employés pour la traction des chemins de fer, sont tels que pendant la marche normale, les inducteurs sont saturés. Ils le seront donc, à fortiori, pendant tout le régime allant du démarrage à la marche normale, d'après ce que nous avons vu plus haut, sur la valeur de l'intensité à ce moment. La conséquence est que, dans un moteur-série, pour toutes les valeurs usuelles de la vitesse, on peut considérer φ comme constant. On pourra donc, en se reportant à la formule (4), énoncer cette règle que *le couple est proportionnel à l'intensité*.

Nous avons établi qu'au moment du démarrage, l'intensité du courant était maxima. On peut donc dire également que, *dans un moteur à courant continu excité en série, le couple, au démarrage, est maximum*. C'est là un avantage merveilleux des moteurs électriques et il est d'autant plus précieux, pour la traction des chemins de fer, que c'est justement au démarrage qu'il faut développer le plus grand effort, ce dernier pouvant alors être facilement 15 à 20 fois plus considérable que l'effort normal, après mise en marche.

Supposons la vitesse de régime atteinte et admettons que le travail résistant vienne à varier (courbe, rampe, etc.). Si l'on veut voir ce que deviendra la vitesse on se reportera à la formule.

$$e = K n \varphi \quad \text{ou} \quad n = \frac{e}{K \varphi}$$

et comme $e = E - RI$, on en déduira :

$$n = \frac{E - RI}{K \varphi} \quad (5)$$

Pour des débits normaux $K\varphi$ est constant comme on l'a vu plus haut et comme E est la tension de distribution, on voit que le travail résistant augmentant, ce qui implique une augmentation correspondante de I, la vitesse ira en diminuant. Mais elle variera cependant assez peu, attendu que, dans des moteurs bien construits, RI est toujours très faible vis-à-vis de E.

Si, au contraire, le travail résistant diminuait, n augmenterait légèrement. Toutefois, à partir d'un certain moment, la vitesse pourrait croître très rapidement; autrement dit, pour les faibles charges, le moteur-série a tendance à l'emballement. On peut le déduire des formules indiquées plus haut, en remarquant que l'intensité du courant sera alors très peu considérable et que le flux φ ne sera plus constant, mais proportionnel à I et de la forme K'I. Par conséquent on aura :

$$n = \frac{E - RI}{KK'I} = \frac{E}{KK'I} - \frac{R}{KK'} \quad (6)$$

formule qui montre que si I diminue, n augmentera très rapidement.

Ces divers régimes d'un moteur-série sont très nettement mis en évidence par sa *caractéristique*. La figure 278 est celle d'un moteur-série de 100 chevaux, 500 volts de la C[ie] Westinghouse en service sur le chemin de fer métropolitain de Paris. Au lieu du couple sur l'arbre moteur on a représenté l'effort de traction F à la jante des roues, qui lui est proportionnel [1] et l'on voit bien

[1] Soit C le couple sur l'arbre moteur, m le rapport des engrenages, D le diamètre des roues motrices, F l'effort de traction à la jante des roues on aura $F = \frac{2m\,C}{D}$.

que cet effort de traction est lui-même proportionnel à I. Bien que dit de 100 chevaux, le moteur peut facilement en développer 180, comme le montrent les lignes représentant la puissance. On

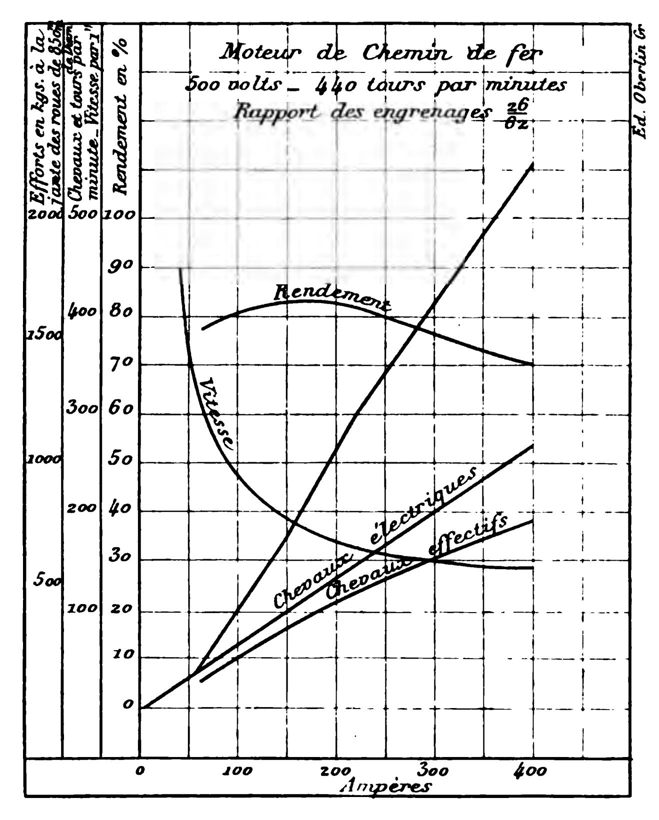


Fig. 278. — Caractéristique d'un moteur-série de 100 chevaux, pour chemin de fer. de la Cie Westinghouse.

a distingué d'une part les *chevaux électriques*, c'est-à-dire la puissance réellement absorbée par le moteur EI, et, d'autre part, les *chevaux effectifs* qui se déduisent des premiers en tenant compte des pertes dues à la résistance intérieure du moteur, aux pertes dans le noyau et aux frottements de l'arbre sur ses paliers. Le

rendement de l'appareil, c'est-à-dire le rapport des chevaux effectifs mesurés sur l'arbre aux chevaux électriques est donné par une courbe spéciale. Elle montre qu'aux environs de la puissance normale le rendement atteint 86 à 87 p. 100.

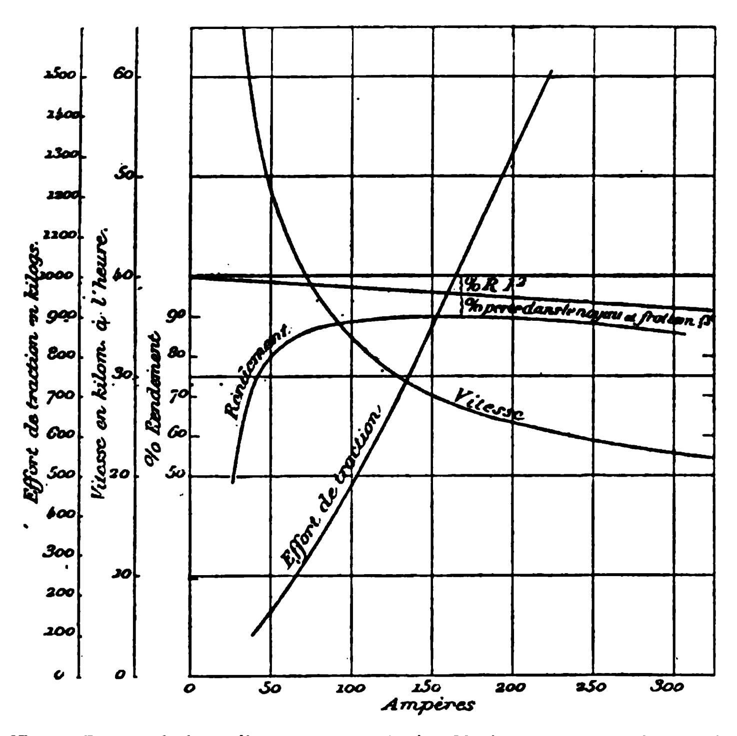


Fig. 279. — Caractéristique d'un moteur-série de 120 chevaux, pour chemin de fer, de la Cie Thomson-Houston.

La figure 279 donne la caractéristique d'un moteur analogue, mais un peu plus puissant, de la Cie Thomson-Houston. On a mis en évidence les deux natures de pertes qui peuvent affecter le rendement du moteur; d'abord les pertes d'énergie dues à la résistance intérieure, soit $I \times RI = RI^2$ et ensuite les autres pertes. On voit que les premières sont assez faibles; à fortiori, il en est de même de RI, ce qui justifie ce que nous

avons dit précédemment à propos des variations de la vitesse. Le moteur est représenté ouvert par la figure 280 et mis en place par la figure 281.

Dans l'un et l'autre moteur l'attaque de l'essieu se fait par



Fig. 280. — Moteur de 120 chevaux, ouvert.

engrenages. Pour obtenir le rendement sur l'essieu moteur, il faudra donc faire intervenir encore les pertes occasionnées par cette transmission, pertes qui sont d'environ 4 à 5 p. 100.

Avec des moteurs « Gearless » cette perte supplémentaire n'existe pas ; mais, sauf pour les modèles puissants et à grande vitesse, le moteur Gearless est moins économique que le moteur à engrenages, car un moteur reçoit son maximum d'utilisation pour

une vitesse périphérique se rapprochant de la limite compatible avec la résistance des parties tournantes à la dislocation sous l'action de la force centrifuge et, à cette limite, correspond,

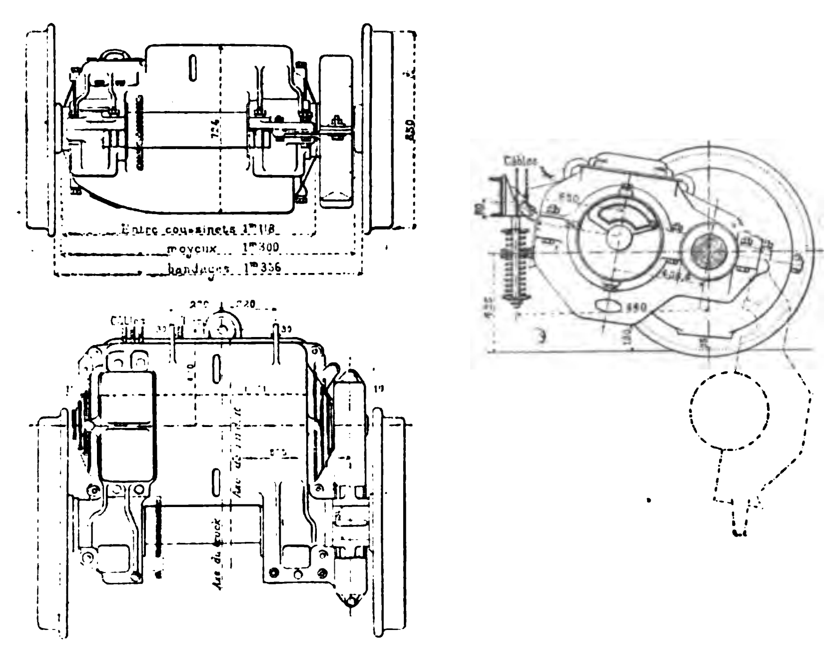


Fig. 281. — Moteur de 120 chevaux, mis en place.

pour les modèles usuels, une vitesse d'au moins 70 à 80 kilomètres à l'heure.

Manœuvre des moteurs-série. — Nous avons donné plus haut le principe du démarrage. Il se fait en intercalant sur le passage du courant des résistances variables.

Ces résistances consomment inutilement du courant. Pour diminuer l'importance de l'énergie perdue, on a imaginé le couplage par *série-parallèle*. Il consiste à prendre l'un des moteurs comme résistance, en le mettant en série sur le premier moteur. Les moteurs et les résistances sont alors en série (fig. 282).

On diminue ensuite graduellement la résistance pour arriver au *couplage en série* sans résistances. Puis les résistances sont de nouveau intercalées sur les moteurs alimentés en parallèle. Et l'on arrive, enfin, au *couplage en parallèle*, sans résistance. Les moteurs sont alors alimentés directement par le courant de la ligne. Si l'on voulait atteindre une vitesse encore plus grande, on shunterait les inducteurs.

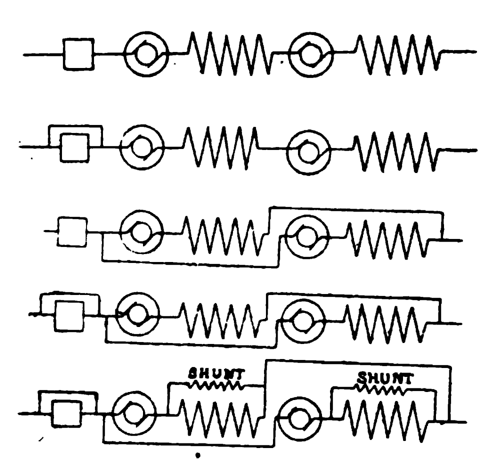


Fig. 282. — Manœuvre des moteurs-séries.

En somme les diverses manœuvres détaillées ci-dessus permettent de passer de la vitesse 0 à la vitesse de régime. On peut donc en conclure qu'elles donnent également un moyen de régler la vitesse. Il est facile de s'en rendre compte, par le calcul, de la façon suivante. Reportons-nous à la formule :

$$e = K n \varphi$$

On en tire :

$$n = \frac{e}{K \varphi} = \frac{E - RI}{K \varphi}$$

Nous avons vu précédemment que RI était très faible par rapport à E. On peut donc négliger le terme et écrire

$$n = \frac{E}{K \varphi}$$

Comme, pour les régimes usuels, φ est sensiblement constant;

on voit que le *nombre de tours par seconde du moteur* (*c'est-à-dire sa vitesse*) *est proportionnel à la différence de potentiel aux bornes*.

Autrement dit si, au lieu d'alimenter un moteur à 600 volts, on ne lui donne que 300 volts, il tournera deux fois moins vite. Or l'insertion de résistances sur le passage du courant aura justement comme effet de diminuer la tension aux bornes et la mise en série des moteurs donnera encore une diminution de vitesse de moitié. Donc par les mêmes manœuvres qui servent au démarrage on pourra faire varier la vitesse dans des limites très étendues.

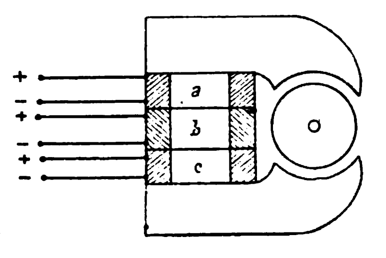


Fig. 283. — Inducteur à galettes.

Comme on a $n = \frac{E}{n\varphi}$ on pourra, tout en recevant le courant à sa tension de distribution, faire varier la vitesse en faisant varier φ. C'est le résultat que l'on a obtenu plus haut en shuntant les inducteurs, c'est-à-dire en dérivant une partie du courant inducteur, et l'on conçoit, d'après ce que montre la formule précédente, que l'on puisse ainsi augmenter la vitesse.

Pour appliquer la méthode à des variations plus étendues, on a parfois divisé le circuit inducteur en « galettes » en couplant celles-ci de façon convenable (fig. 283). Mais un tel procédé est beaucoup moins simple que le couplage par série-parallèle.

Pour arrêter, il suffit de couper le courant et d'appliquer les freins. Toutefois si l'on coupait brusquement le courant, il se produirait des extra-courants dangereux. Aussi devra-t-on diminuer progressivement l'intensité du courant circulant dans le moteur. On y arrive facilement à l'aide des résistances de démarrage, que l'on parcourt en sens inverse. Mais, alors que le démarrage nécessitait une insertion pas trop précipitée des résistances, on pourra, pour l'arrêt, passer très vite sur les rhéostats.

La *marche arrière* s'obtiendra en changeant le sens du courant soit dans les inducteurs, soit dans l'induit mais, de préférence

dans ce dernier, afin de ne pas affaiblir par trop le magnétisme rémanant des inducteurs.

Considérons un moteur-série, en marche normale. La ligne des balais *mn* se trouvera en arrière de la ligne neutre *xy*, par rapport au sens du mouvement (fig. 284).

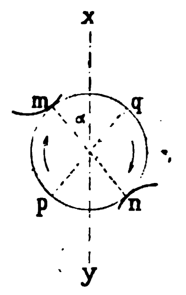


Fig. 284. — Marche arrière.

Si l'on change le sens du courant dans l'induit, le sens du mouvement va changer et la ligne des balais se placera suivant *pq*. Par conséquent, pour changer le sens de la marche on devra, en même temps que l'on changera le sens du courant, déplacer les balais de l'angle π-2α[1]. Cette manœuvre ne serait pas bien commode à effectuer. On a pu l'éviter en faisant en sorte que la ligne des balais coïncide exactement avec la ligne neutre *xy*. Cela revient à dire que la réaction d'induit du moteur doit être très faible, ce que l'on obtient en prenant des champs inducteurs très puissants.

Appareils de manœuvre. — Pour pouvoir effectuer commodément ces diverses manœuvres on se sert du *contrôleur*, appareil qui devrait être plutôt appelé *combinateur ;* mais on a adopté le premier mot, qui rappelle celui de « controller » nom sous lequel l'appareil est universellement désigné en Amérique (fig. 285).

En somme le *contrôleur* n'est qu'une sorte d'interrupteur à touches multiples, permettant d'envoyer successivement le courant dans les circuits qui doivent être combinés pour le démarrage de la manœuvre des moteurs. C'est un grand cylindre vertical, logé dans une boîte, et se prolongeant au-dessus de la boîte pour venir s'encastrer dans la tête d'une manivelle. Toutes les manœuvres s'effectuent pour une rotation complète de la manivelle, et des points de repère, marqués sur le couvercle supé-

[1] Si on les faisait seulement tourner de l'angle 2α ils seraient pris à rebrousse-poils.

rieur de la boîte, en regard de la manivelle, correspondent aux diverses combinaisons que le couplage série-parallèle permet de réaliser.

Les contacts successifs que le contrôleur effectue donnent lieu,



Fig. 285. — Contrôleur pour deux moteurs.

surtout s'ils sont faits avec mollesse, à des étincelles qui peuvent prendre une grande importance, étant donnée l'intensité qui passe alors par les contacts. Aussi dispose-t-on souvent, en regard de chaque contact, un appareil de soufflage magnétique, qui n'est autre qu'une bobine créant, au moment de la rupture, un champ magnétique, qui agit sur l'étincelle et l'empêche de se maintenir.

Un contrôleur est, en réalité, un appareil compliqué et, en raison du grand nombre de ruptures de courant qu'il doit effectuer, il est soumis à un service très dur. Il doit donc être extrêmement bien conditionné. Les constructeurs ont apporté à sa

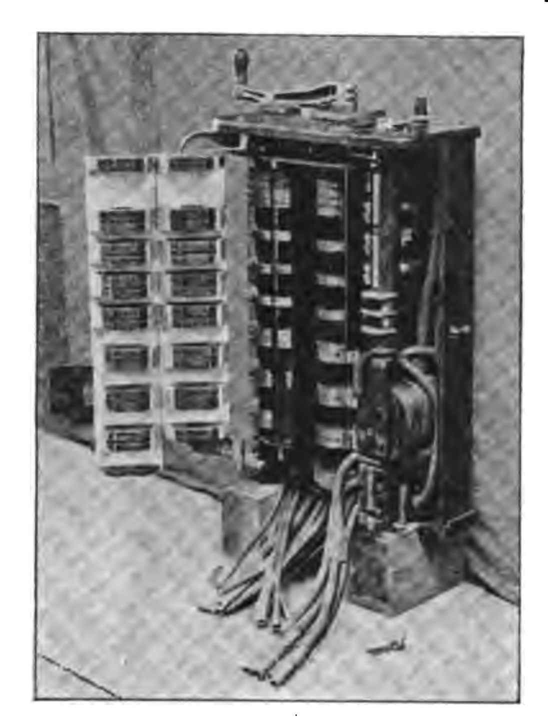


Fig. 286. — Contrôleur Thomson-Houston pour deux séries de deux moteurs.

fabrication des perfectionnements incessants et aujourd'hui il en existe d'excellents. Mais l'appareil n'en nécessitera pas moins une surveillance assidue, constituant, dans l'équipement électrique d'une voiture, la partie la plus fragile et la plus sujette aux détériorations.

Le contrôleur, indépendamment de sa grande manette de manœuvre, en possède une autre qui correspond à l'inversion de courant nécessaire pour obtenir la marche arrière de la voiture.

Cette manette auxiliaire ne peut toutefois être manœuvrée qu'autant que la grande manette a été ramenée au zéro.

Enfin, dans l'intérieur du contrôleur, un dispositif permet d'isoler l'un quelconque des moteurs, ce qui donne la possibilité de marcher avec un seul moteur, en cas d'avarie survenue à l'autre.

Le cas le plus général que l'on rencontre pour la traction des chemins de fer est celui d'un contrôleur actionnant deux moteurs. Mais on peut, avec l'appareil, commander des équipements à quatre moteurs, ces derniers intervenant par groupes de deux (fig. 286).

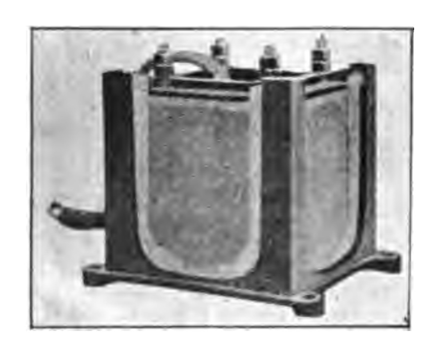


Fig. 287. — Résistances, type de la General Electric Company.

Les *résistances* sont constituées par des rubans ou des plaques de tôle que sépare une matière isolante et incombustible (amiante) (fig. 287). Ces appareils atteignent facilement une température de 150 à 200 degrés. On ne peut donc pas les installer en un point quelconque de la voiture et généralement on les monte sous le plancher, disposition qui facilite le refroidissement. Mais, comme ces résistances pèsent de 7 à 800 kilogrammes, on ne pourra pas toujours les placer commodément et l'on devra s'en préoccuper quand on aura à établir les projets du matériel roulant.

La température élevée à laquelle peuvent être momentanément portées les résistances, doit appeler l'attention sur toutes les jonctions que l'on peut avoir à effectuer soit de bobine à bobine, soit entre les résistances et les conducteurs. On devra, notamment, éviter les soudures qui risqueraient de fondre sous l'action d'une surélévation de la température.

Moteurs à courant continu avec excitation en dérivation. — Ces

moteurs sont très peu employés pour la traction des chemins de fer. Ce n'est pas qu'ils ne présentent quelques-unes des qualités primordiales des moteurs-série. En particulier ils jouissent de cette propriété de développer, au démarrage, un couple maximum. Mais ils sont d'une construction plus compliquée, comportant des inducteurs avec des enroulements en fil fin, de très grande longueur et d'un isolement par conséquent assez difficile. En revanche ils sont tout à fait aptes à la *récupération*, qualité précieuse pour un chemin de fer à profil accidenté (Ouest-Lyonnais). On a pu aussi les appliquer avantageusement à la traction par accumulateurs, en se servant de la récupération pour recharger les accumulateurs en cours de route.

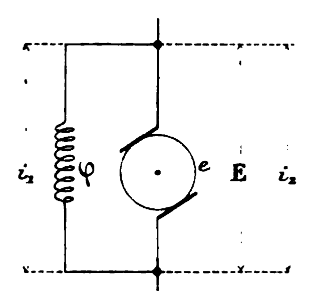


Fig. 288. — Schéma d'alimentation d'un moteur excité en dérivation.

On peut analyser très rapidement les propriétés fondamentales des moteurs en dérivation, en partant des formules élémentaires indiquées plus haut.

Soit toujours E la différence de potentiel aux bornes (de 5 à 700 volts). Le courant I arrivant de la ligne, se divise en deux l'un i_1, traversant les inducteurs et l'autre i_2, traversant l'induit (fig. 288). Si r_1 est la résistance des inducteurs on aura $i_1 = \frac{E}{r_1}$. Comme il s'agit d'une distribution à potentiel constant, E est constant, donc i_1 sera constant et il en sera de même du flux φ produit par le courant i_1, en circulant dans les fils inducteurs.

Soit r_2 la résistance de l'induit et e sa force contre-électromotrice. On aura :

$$i_2 = \frac{E - e}{r_2} \quad \text{et} \quad e = K\,n\,\varphi$$

D'où :

$$n = \frac{e}{K\,\varphi} = \frac{E - i_2\,r_2}{K\,\varphi}$$

Comme, pour un régime normal, $i_2 r_2$ est faible vis-à-vis de E, on aura sensiblement $n = \frac{E}{k\varphi}$; autrement dit n sera constant.

Ainsi donc le moteur, si E reste constant, ce qui est l'hypothèse admise, conservera toujours la même vitesse. Par conséquent les rampes seront parcourues par le moteur à la même allure que les paliers. Un tel avantage n'est certainement pas à dédaigner, car il facilite la besogne du mécanicien qui n'a pas à s'occuper du réglage de la vitesse. Mais on conçoit qu'un tel résultat ne puisse être obtenu sans un appel de courant très considérable, courant qui s'établit parce que les moteurs ayant tendance à ralentir, e diminue et par suite i_2, qui est égal à $\frac{E - e}{r_2}$, augmente.

Inversement, si le train descend une pente, e tend à augmenter et à dépasser E ; à ce moment i_2 devient négatif, c'est-à-dire que le moteur devient générateur et envoie le courant qu'il produit dans la ligne. Ainsi s'explique le phénomène de *récupération* auquel nous avons fait allusion plus haut [1].

Pour démontrer que le couple C est maximum au démarrage, il suffit de remarquer que l'on a :

$$C = \frac{e\, i_2}{2\pi n} = \frac{K\, n\, \varphi\, i_2}{2\pi n} = \frac{K\, \varphi}{2\pi}\, i_2$$

c'est-à-dire que le couple est proportionnel à i_2; et comme, au démarrage, i_2 est maximum, il en est de même de C.

Enfin l'expression approchée $n = \frac{E}{k\varphi}$ montre que l'on pourra faire varier la vitesse soit en faisant varier la différence de potentiel aux bornes de l'induit, ce que l'on obtiendra en insérant des résistances sur le circuit de l'induit, soit en diminuant φ, résultat qui sera atteint facilement par l'insertion de résistances sur le circuit des inducteurs.

Les résistances d'induit seront également nécessaires pour le

[1] Ce phénomène se produirait également si le moteur était à excitation indépendante, ou était muni d'une excitation pouvant devenir indépendante au moment où la récupération est possible.

démarrage, car la résistance ohmique de l'induit est très faible et comme, à ce moment, la force contre-électromotrice est nulle, il se produirait, sans les résistances, un afflux de courant exagéré. Ces résistances devront être telles qu'elles limitent l'intensité à trois ou quatre fois seulement la valeur qu'elle atteint pendant la marche normale.

Moteurs à courants alternatifs monophasés. — Les moteurs à courants alternatifs monophasés les plus répandus dans l'industrie sont des *moteurs synchrones*. Nous en avons déjà expliqué le principe. Ce sont, en somme, des dynamos à courant alternatif fonctionnant comme moteurs, en vertu du principe de la réversibilité. Si on suppose deux alternateurs identiques, l'un fournissant du courant alternatif de tension et de période données et l'autre recevant ce courant il pourra, si on « l'accroche » avec le premier, c'est-à-dire si on lui donne artificiellement une vitesse le mettant en synchronisme avec le premier, fonctionner comme moteur et supporter même des surcharges de 40 à 50 p. 100.

Mais on conçoit que la manœuvre première à accomplir, c'est-à-dire la mise en synchronisme, soit incompatible avec les exigences d'un service de traction. C'est une difficulté devant laquelle on a jusqu'ici reculé et si le moteur synchrone a été proposé, c'est de préférence pour actionner sur la locomotive une génératrice à courant continu, envoyant à son tour du courant dans les moteurs. Cette disposition, spécialement étudiée par les ateliers d'Œrlikon, permet d'abord l'utilisation directe de courants monophasés. Et ensuite elle se concilie très bien avec la méthode de réglage de la vitesse des moteurs par variation du champ magnétique, ce que l'on obtient dans ce cas facilement et économiquement, en agissant sur l'excitation de la génératrice.

On voit que l'on est ramené, par ce système, au cas déjà étudié des moteurs à courant continu.

Il n'est pas impossible, cependant, d'appliquer les moteurs synchrones à la traction des chemins de fer, mais en les transformant pendant la période du démarrage en *moteurs asynchrones* en alimentant, par exemple, à ce moment, le *stator* par deux circuits ; tous les deux traversés par le courant monophasé, mais le deuxième présentant une self-induction qui produit un décalage de phase. On rentre alors dans la catégorie des moteurs asynchrones à courants polyphasés (ou à champs tournants), moteurs qui, ainsi que nous le verrons plus loin, peuvent démarrer d'eux-mêmes sous charge.

Mais une telle méthode n'est pas sans inconvénients au point de vue de la résistance apparente qu'elle crée sur le réseau et les inventeurs ont préféré combiner des moteurs se rapprochant des moteurs-série, dont les avantages, au point de vue de la traction des chemins de fer, sont aujourd'hui si solidement établis.

Considérons un moteur, à courant continu en série avec excitation. Si on abaisse la tension du courant qui l'alimente, il fonctionnera toujours comme moteur-série, le sens du courant restant le même dans les inducteurs et dans l'induit. Changeons le sens du courant, c'est-à-dire donnons-lui une tension négative, le sens du courant va changer *à la fois* dans les inducteurs et dans l'induit et les actions réciproques resteront par conséquent les mêmes. Donc, si on alimente un moteur-série à courant continu par un courant alternatif, il fonctionnera comme un moteur à couple variable (puisque le couple est proportionnel à l'intensité) et il s'établira un couple moyen permettant d'actionner les roues d'une locomotive ou d'une automotrice tout aussi bien que s'il s'agissait d'un moteur à courant continu.

Mais un tel moteur devra être construit d'une façon spéciale, afin d'éviter les échauffements que produiraient les courants alternatifs dans les masses métalliques de l'induit et des inducteurs. Non seulement le corps de l'induit devra être constitué par des feuilles de tôle disposées perpendiculairement aux courants

de Foucault qui pourront se produire, mais il devra en être de même de l'inducteur. Et ainsi arrive-t-on au type de moteur dit à inducteurs feuilletés, type qui, d'après les essais effectués par la Cie Westinghouse, sur le chemin de fer Washington-Balti-

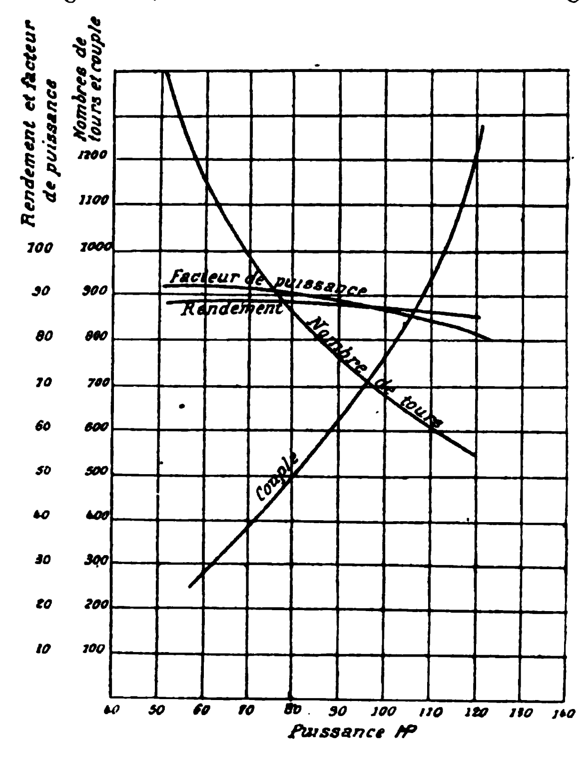


Fig. 289. — Moteur à courant alternatif simple (système Westinghouse).

more-Annapolis, convient parfaitement pour le cas du courant alternatif monophasé.

Nous donnons, figure 289, la caractéristique d'un tel moteur. On voit qu'elle se rapproche beaucoup de celles qui ont été données précédemment pour des moteurs à courant continu. Si E et I sont respectivement la tension efficace et l'intensité efficace du courant alternatif alimentant le moteur, la puissance élec-

trique sera non pas EI, mais EI $\times$ cos φ, cos φ étant le facteur de puissance. La courbe montre que ce facteur se tient aux environs de 90 p. 100, ce qui est très satisfaisant.

Un tel moteur se manœuvre avec autant de facilité, sinon plus, qu'un moteur à courant continu. En effet, l'abaissement de la tension aux bornes que l'on obtient, pour un moteur à courant continu, par l'intercalation de résistances sur le circuit d'alimentation peut, avec du courant alternatif, s'obtenir par des *transformateurs statiques*, dont les rendements atteignent facilement 94 à 95 p. 100, alors que la totalité de l'énergie absorbée dans des résistances est perdue pour la traction.

Voici comment l'on opère sur la ligne d'Annapolis. Les voitures motrices sont à quatre moteurs de 100 chevaux et 220 volts, montés par deux en série. Le courant alternatif est fourni par une ligne aérienne à la tension de 1 000 volts, mais il est abaissé dans les voitures, par un auto-transformateur, à la tension de 315 volts. Ce courant à 315 volts passe à son tour dans le secondaire d'un autre transformateur qui peut ajouter ou retrancher de 0 à 100 volts. On aura donc la possibilité d'appliquer aux bornes des moteurs de 200 à 415 volts, ce qui suffit largement pour les diverses manœuvres que l'on a à effectuer.

Le transformateur à tension variable n'est autre qu'un transformateur statique dans lequel les bobines secondaires peuvent être placées plus ou moins obliquement par rapport à la direction du flux produit par les bobines primaires. La force électromotrice, maxima quand les bobines secondaires sont perpendiculaires aux flux, diminuera avec le plus ou moins d'inclinaison des bobines sur la direction du flux. Elle sera d'autre part positive (de 0 à + 100 volts) dans un secteur de 90° et négative (de 0 à — 100 volts) dans le secteur inférieur de même amplitude. En sorte que toutes les variations voulues de voltage (de — 100 volts à + 100 volts) s'obtiendront par une simple rotation des bobines de 180 degrés.

Il est à remarquer que la méthode ci-dessus ne convient pas seulement au cas d'une distribution à 1 000 volts. Elle pourrait tout aussi bien être appliquée à une distribution à tension plus élevée, notamment à une distribution à 10 000 volts, tension que les expériences de Zossen ont montrée comme pouvant être distribuée d'une façon suffisamment pratique, le long d'une voie de chemin de fer.

Moteurs à courants alternatifs polyphasés. — Les moteurs à courants alternatifs polyphasés peuvent être ou *synchrones* (et, dans ce cas, ils se comportent comme des moteurs à courants alternatifs monophasés) ou *asynchrones* constituant alors une classe particulièrement remarquable de moteurs, pouvant démarrer sous charge et offrant des avantages spéciaux au point de vue du maintien de la vitesse et de la récupération de l'énergie.

Dans ces derniers moteurs on utilise cette propriété des champs magnétiques polyphasés de pouvoir produire, par leur combinaison, un ou plusieurs *champs magnétiques tournants*.

Les moteurs asynchrones pour traction se composent d'un rotor et d'un stator, tous les deux concentriques et constitués par des feuilles de tôle empilées perpendiculairement à l'axe. A la périphérie du rotor, et dans des encoches taillées dans les feuilles de tôle, suivant des génératrices du cylindre, sont logés des conducteurs de cuivre isolés. La surface intérieure du stator porte également des encoches munies de barres isolées (ou de fils) et c'est dans ces barres que l'on amène les courants polyphasés de la ligne. Ces courants produisent des champs tournants et ceux-ci, en se déplaçant autour du stator, développent dans les barres de ce dernier des courants induits qui, par réaction, font tourner le rotor.

La création de champs tournants s'explique facilement par la figure 290, qui représente l'enroulement du stator développé. Supposons que les barres soient parcourues par des courants différant d'un 12e de période. Dès lors, à un moment donné, l'inten-

sité passant par les barres, correspondra pour chacune d'elles aux ordonnées de la sinusoïde *mnoq*, représentant le courant alternatif élémentaire. Pour cette position les barres 7 et 12 seront traversées par des courants de même intensité, mais de sens inverse, en sorte qu'elles sont assimilables à une bobine, elles vont donc créer un pôle magnétique P_2 dont les lignes de force se rejoindront par les pôles voisins, mais de nom contraire P_1 et P_3. Il en sera de même de 8 et 11 et de 9 et 10. A l'instant consi-

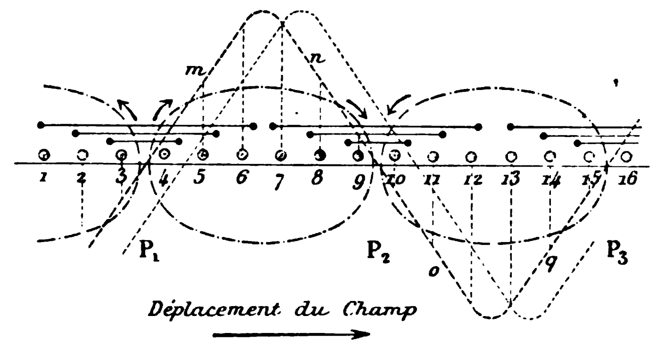


Fig. 290. — Création des Champs tournants.

déré les barres formeront donc trois pôles P_1, P_2, P_3 alternativement de sens contraire, avec lignes de force dirigées suivant les flèches.

Au bout d'un temps égal à 1/12e de période, on obtiendra une figure analogue, mais avec pôles décalés, vers la droite, d'un 12e de période, c'est-à-dire que, dans le cas de la figure, les axes des pôles passeront par les milieux de 4-5, 10-11, 16-17. Donc le champ magnétique va se déplacer vers la droite. Et si l'on suppose le stator, non plus développé, mais rétabli suivant un cylindre, on verra que le champ tournera le long de ce cylindre, créant, par conséquent, un champ magnétique tournant.

Le nombre de champs tournants dépendra du nombre des barres du rotor; il y aura autant de champs qu'il y aura de fois 12 barres dans l'enroulement du stator.

Nous avons dit que les champs tournants, en agissant sur les barres du rotor, y développaient des courants d'induction. Ces courants n'étant fournis au rotor par aucune source extérieure, l'emploi d'un collecteur devient inutile. On a même combiné des petits moteurs à champs tournants dans lesquels le rotor est simplement constitué par un cylindre de fer. Mais la résistance intérieure de tels moteurs est considérable et dans les moteurs de traction on se sert toujours de barres ou de fils. Ces barres ou ces fils pourraient être simplement réunis par des couronnes, constituant alors ce que l'on appelle l'*induit à cage d'écureuil.* Mais comme on le verra plus loin, il est nécessaire, pour les différentes manœuvres que l'on a à effectuer avec des moteurs à courants polyphasés (démarrage, réglage de vitesse, etc.), de pouvoir insérer des résistances variables dans le rotor. Aussi divise-t-on celui-ci en circuits polyphasés, aboutissant à des bagues montées sur l'arbre. Sur ces bagues frottent des balais reliant les enroulements aux résistances.

Tous les raisonnements sommaires faits ci-dessus s'appliqueraient également à des courants biphasés ou triphasés.

On voit, finalement, combien un moteur à courants polyphasés peut être constitué simplement. Il en découle une simplification très marquée de l'entretien. On doit cependant faire remarquer que de tels moteurs ne comportent qu'un entrefer très faible et qu'il faut, par suite, surveiller attentivement les paliers, afin d'éviter que le rotor ne vienne à toucher le stator.

Soit, dans un moteur à courants polyphasés, ω_1 la vitesse angulaire du champ tournant, ω_2 celle de l'induit (rotor). Prenons deux axes de coordonnées rectangulaires et portons d'une part en abscisses les différentes valeurs de ω_2 et en ordonnées celles du couple C. On obtiendra la courbe DMB, représentée par la figure 291, et qui coupe l'axe des x en un point B, tel que $OB = \omega_1$.

Cette courbe montre que lorsque $\omega_2 = \omega_1$ le couple est nul, ce qui se conçoit d'ailleurs parfaitement puisqu'à ce moment,

inducteurs et induits tournent à la même vitesse et que par conséquent il n'y a pas de force électro-motrice développée dans l'induit. Puis, pour une diminution légère de ω_2, le couple croît rapidement; il passe ensuite par un maximum QM et atteint la valeur OD, au démarrage.

Cette dernière valeur est faible quand on la compare à un

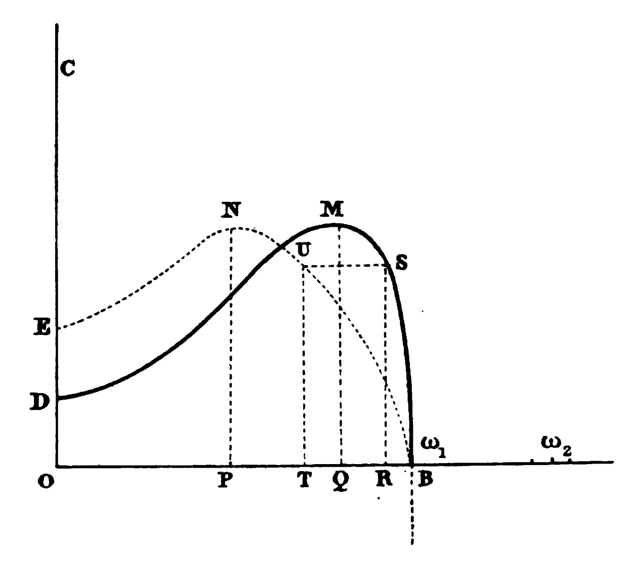


Fig. 291. — Couple dans un moteur à champ tournant.

couple de moteur à courant continu; mais on peut l'augmenter notablement en intercalant des résistances dans le rotor, ce qui s'obtient aisément, comme on l'a dit plus haut, en divisant celui-ci en un certain nombre de circuits polyphasés aboutissant à des bagues montées sur l'arbre et correspondant aux résistances. C'est ainsi qu'avec une résistance supplémentaire on obtiendra la courbe ENB au lieu de DMB, avec un couple de démarrage de OE au lieu de OD.

On appelle *glissement* le rapport $\frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1}$ et l'on démontre d'autre part que le rendement d'un moteur polyphasé croît quand

le glissement diminue. Il y a par suite intérêt à faire travailler le moteur avec un glissement très faible, par exemple, avec celui correspondant à la région QMB de la courbe.

Un autre avantage sera que, dans cette région, pour des variations importantes du couple, le moteur conservera sensiblement sa vitesse, ce qui donnera une grande stabilité de régime et per-

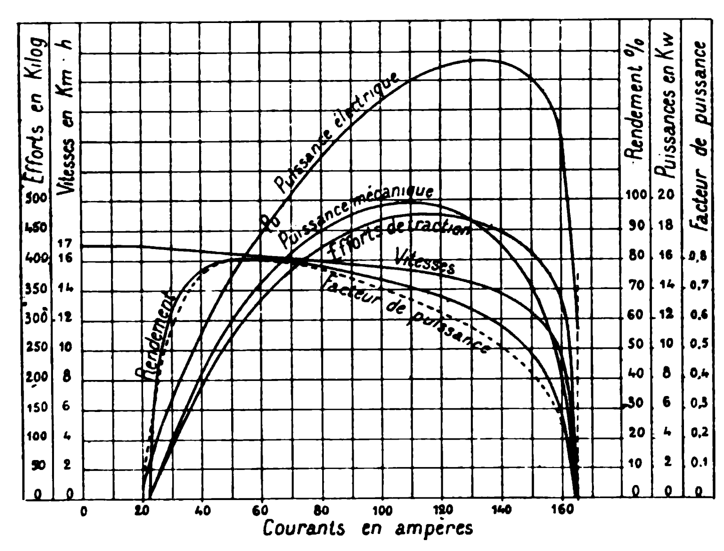


Fig. 292. — Caractéristique d'un moteur triphasé à basse tension.

mettra au moteur de se régler de lui-même. On pourra donc monter des rampes prolongées à vitesse constante et sans que le conducteur ait à intervenir, ce qui est particulièrement commode pour des lignes de montagne.

Supposons, d'autre part, que, sous l'action d'une pente, la vitesse du moteur dépasse ω_1. Aussitôt le couple deviendra négatif (ligne ponctuée au-dessous de l'axe des x) et le moteur deviendra générateur, envoyant alors du courant sur la ligne. Il y aura, à ce moment, récupération et le moteur se tiendra de lui-même aux environs du synchronisme. Il agira donc également comme

un frein en envoyant alors du courant, par la ligne, à l'usine génératrice.

A ce point de vue, certaines précautions devront être prises,

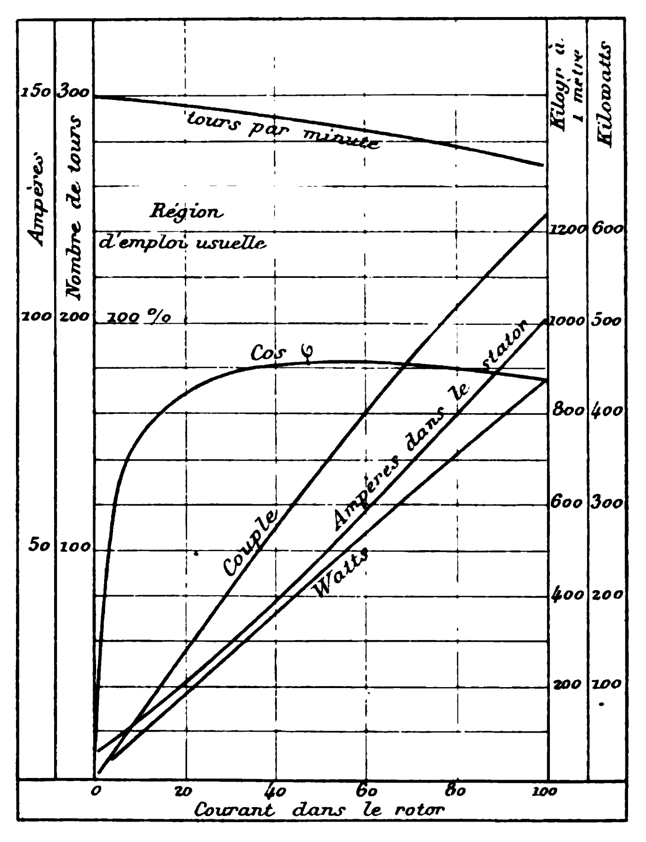


Fig. 203. — Caractéristique des moteurs triphasés à 3000 volts du chemin de fer de la Valteline.

afin que les machines de l'usine ne se trouvent pas subitement déchargées. Avec les turbines, notamment, un emballement serait à redouter.

Il convient de remarquer, également, que le moteur n'agira comme frein qu'autant qu'il communiquera avec la ligne. Or, en

cas de mauvais contact ou de déraillement du trolley, cette communication pourrait parfaitement se trouver brusquement interrompue. Il y aurait alors à craindre une accélération dangereuse de la voiture. C'est pour cette raison que, sur certaines lignes de montagne (Jungfrau), on a renoncé à envoyer le courant de récupération dans la ligne.

Pour pouvoir utiliser, cependant, le freinage électrique, on isole le moteur et on alimente son *stator* avec du courant continu engendré par une petite dynamo dont le mouvement est produit par celui même de la voiture. Le *rotor*, tournant dans un champ magnétique fixe, devient générateur de courants triphasés et ceux-ci sont envoyés dans les résistances de démarrage. En faisant varier l'intensité du courant continu, on peut exercer telle action de freinage que l'on désire, même au-dessous de la vitesse du synchronisme, puisque le courant triphasé de la ligne n'a plus à intervenir.

Comme pour les moteurs à courant continu nous mettrons en évidence les propriétés principales des moteurs polyphasés en donnant quelques caractéristiques.

La figure 292 se rapporte à un moteur triphasé de 25 à 30 chevaux, alimenté par une ligne à basse tension (220 volts polygonaux), les abscisses représentant le courant dans l'une des trois branches de l'inducteur[1].

Dans la figure 293 nous avons représenté les courbes caractéristiques des moteurs de 300 chevaux à 3 000 volts du chemin de fer de la Valteline, en prenant cette fois, comme abscisses, les ampères produits dans le rotor. On voit que, dans toute la région où la puissance se tient aux environs de la normale, le facteur de puissance est très élevé. Dans les mêmes parages la vitesse varie également très peu.

Manœuvre des moteurs à courants polyphasés. — Ces moteurs

[1] Blondel et Dubois. *La traction électrique sur voies ferrées.*

se manœuvrent aussi facilement que des moteurs à courants continus.

Il est à remarquer, en outre, que, même quand on alimente directement les moteurs par de hautes tensions, on a la possibilité, en agissant seulement sur le rotor, de n'avoir à manœuvrer que des appareils ou des conducteurs parcourus par des courants à basse tension. C'est ainsi que, sur le chemin de fer de la Valteline, le rotor n'est parcouru que par des courants à 300 volts, au maximum, alors que le stator est alimenté à 3 000 volts. Sur le chemin de fer de Zossen (moteurs à 10 000 volts) la tension dans le rotor atteint, au plus, 700 volts.

Voyons d'abord la question du démarrage. En mettant des résistances en circuit avec le rotor on augmentera le couple de démarrage et on se rapprochera, par conséquent, des conditions de démarrage des moteurs à courant continu. C'est ainsi que l'on opère sur le chemin de fer de Thoune à Burgdorf.

Quand le courant est utilisé après transformation sur la voiture, on peut employer des transformateurs permettant d'atteindre la tension normale en deux ou trois échelons et nous avons vu, en particulier, une application de ce système sur le chemin de fer d'Annapolis. De même on peut soit diminuer le nombre des pôles inducteurs, soit modifier la fréquence. Mais ces diverses manœuvres ne sont pas bien commodes à effectuer. Aussi, à part le démarrage par résistances, ne signalerons-nous, comme d'une application commode et d'ailleurs très intéressante, que le *démarrage par couplage des moteurs en cascade*. Ce couplage fonctionne sur la ligne de la Valteline. Il rappelle le couplage série-parallèle des moteurs-série, sur les avantages duquel nous avons précédemment insisté. Les moteurs ont, comme nous l'avons dit plus haut, une puissance de 300 chevaux et, au moment du démarrage, il se produit dans le *rotor* un courant à la tension de 300 volts. Le courant est envoyé dans le *stator* d'un second moteur en série lui-même sur une résistance et qui sert jusqu'àce que la vitesse ait

atteint la moitié du synchronisme. Puis on le supprime du circuit et on relie le rotor du premier moteur à la résistance, comme dans le cas envisagé plus haut de la ligne de Thoune à Burgdorf.

Il y a ainsi quatre moteurs par voiture, deux servant d'une façon constante et les deux autres n'intervenant que pour les démarrages ou encore pour les arrêts, comme il va être expliqué plus loin.

Nous avons vu que les moteurs polyphasés ne pouvaient pas dépasser une certaine vitesse, correspondant au synchronisme. Si l'on veut ralentir, l'insertion de résistances sur le circuit-induit permettra d'obtenir facilement un tel résultat. Si l'on se reporte en effet à la figure 291 et à la courbe de couple BNE avec résistances, on verra que pour un couple donné SR, sans résistances, on aura une vitesse de rotation OR et qu'au même couple UT avec résistances, correspondra une vitesse plus faible OT.

Pour obtenir l'arrêt on insérera sur le rotor les mêmes résistances, que pour le démarrage, mais en sens inverse, après quoi on interrompra le courant.

Avec le groupement en cascades on aura la possibilité de récupérer, pendant l'arrêt, une partie importante de l'énergie consommée pour le démarrage.

Cette propriété qui pourrait être mise à profit, avec une utilité sur laquelle il n'est pas besoin d'insister, pour une exploitation métropolitaine, tient à ce que, pendant le couplage en cascade, la vitesse du synchronisme est diminuée de moitié pour les moteurs et par conséquent, au-dessus du demi-synchronisme, il y a récupération.

On peut s'en rendre compte aisément de la façon suivante. Revenons aux voitures de la Valteline et considérons un moteur en marche normale. Son glissement n'est alors que de 4 à 5 p. 100. Or, pour un glissement nul (synchronisme), la tension du courant produit dans le rotor est nulle et pour un glissement de 100 p. 100 cette tension est de 300 volts, d'après ce qui a été dit plus haut.

Donc, avec un glissement de 5 p. 100, la tension dans le rotor sera de 5 p. 100 de 300 volts = 15 volts et la fréquence sera 5 p. 100 de celle du courant primaire.

Envoyons le courant du rotor dans le stator du moteur en cascade. Il produira un champ tournant, mais la vitesse de celui-ci ne sera que de 5 p. 100 de celle du champ tournant produit par le stator du premier moteur. Or, par suite de la vitesse de la voiture le rotor va tourner à une vitesse bien supérieure. Donc le moteur en cascade fonctionnera au-dessus du synchronisme et deviendra générateur. Le courant produit se rendra dans le rotor du premier moteur créant un champ tournant inverse de celui produit par le courant d'alimentation et qui tendra à diminuer la vitesse de synchronisme. Il y aura équilibre, pour la moitié du synchronisme, parce que, au-dessus, les phénomènes ci-dessus auront tendance à se produire et au-dessous c'est le premier moteur qui agira pour accélérer la vitesse du second.



Fig. 294. — Contrôleur pour moteur à courants triphasés (chemin de fer de Thoune à Burgdorf).

On voit donc bien que, lorsque les moteurs sont groupés en cascade, la vitesse du synchronisme est réduite de moitié et que, par conséquent, pour une vitesse supérieure, il y aura récupération de l'énergie.

Pour aller jusqu'à l'arrêt il suffira, dès que la vitesse du demi-

synchronisme aura été atteinte, de découpler le moteur en cascade et de brancher le premier moteur sur les résistances.

Pendant la marche, le couplage pourra être également avantageusement opéré, par exemple si l'on aborde une forte rampe. La vitesse baissera alors de 50 p. 100 et l'on ne fera qu'un appel de courant modéré à la station centrale.

Le même couplage permettra également, dans les pentes, de ralentir jusqu'à moitié vitesse environ, en récupérant encore de l'énergie, c'est-à-dire en faisant fonctionner les moteurs comme des freins.

Enfin il nous reste à examiner le *changement dans le sens de la marche* des moteurs polyphasés. Il est clair que si on change le sens du champ tournant, le résultat cherché sera obtenu. Il suffira pour cela, dans un moteur à courants triphasés, d'agir sur deux des phases.

Appareils de manœuvre. — Les appareils de manœuvre sont plus simples, pour un moteur polyphasé, que pour un moteur à courant continu, les combinaisons de courant et de résistances étant moins nombreuses. La figure 294 représente le contrôleur des voitures du chemin de fer de Thoune à Burgdof.

Ce contrôleur n'est, en somme, qu'un puissant interrupteur. Il comporte également une roue dentée, avec chaîne de transmission, permettant l'insertion graduelle des résistances, dans le circuit du rotor, au moment des démarrages (voy. p. 415).

Sur le chemin de fer de la Valteline on agit, comme on l'a dit plus haut, sur le rotor, qui a, au plus, 300 volts et les appareils de manœuvre sont, par suite, très simplifiés.

Les résistances pour le démarrage et le réglage de la vitesse sont constitués soit par des résistances métalliques, soit par des rhéostats liquides.

Le rhéostat liquide de la Valteline est particulièrement intéressant. Il y a trois rhéostats : un pour chacun des courants alter-

natifs simples constituant le courant triphasé. Dans chaque élément se trouvent quatre lames de fer plongeant plus ou moins dans une solution de bicarbonate de soude. Le courant arrivant par l'une des lames gagne les suivantes en traversant la solution. Au fur et à mesure que la hauteur de la solution augmente, la résistance diminue. On obtient très aisément cette ascension du liquide en exerçant sur le réservoir une pression, à l'aide de l'air comprimé dont on dispose pour le freinage et la manœuvre du trolley. De cette façon l'insertion des résistances se fait graduellement et l'on évite les à-coups inévitables qu'occasionnent les résistances métalliques.

CHAPITRE VII

TRACTION

Résistances à vaincre. Résistance au roulement. Résistance de l'air à l'avant du train. Résistance occasionnée par les courbes. Rampes et pentes. Démarrages. Adhérence. Freinages. Puissance. Consommation d'énergie : *a*) Consommation par tonne-kilomètre. *b*) Consommation par place-kilomètre. Réduction de la consommation. La traction électrique et la traction à vapeur.

Résistances à vaincre. — Le problème de la traction, déjà si important pour une exploitation à vapeur, se présente avec une ampleur encore plus marquée dans le cas des chemins de fer électriques. Cela tient à ce que l'électricité, grâce aux qualités fondamentales des moteurs électriques, a permis d'appliquer à la mise en mouvement des trains des efforts particulièrement intenses. En même temps la liaison directe des trains aux usines, c'est-à-dire avec une puissance relativement indéfinie et en tout cas beaucoup plus considérable que celle des trains à vapeur, qui transportent avec eux leur propre usine, a donné la possibilité de réaliser des vitesses très élevées, en même temps que des démarrages extrêmement rapides.

Mais, comme conséquence, on a dû apporter une attention spéciale aux éléments de la résistance susceptibles de croître avec la vitesse du train (notamment la résistance de l'air), en même temps que l'on a dû se préoccuper, pour pouvoir utiliser la grande puissance de traction que donnent les moteurs, d'augmenter l'adhérence ou plutôt le nombre des essieux moteurs.

Si l'on veut analyser la série des efforts dont la somme constitue

la résistance totale à vaincre par un train en mouvement, on distinguera :

1° La résistance due au roulement ;

2° La résistance de l'air ;

3° La résistance occasionnée par les courbes ;

4° La résistance occasionnée par les rampes.

Résistance au roulement. — Considérons d'abord les *voitures remorquées.* Trois facteurs vont intervenir pour déterminer la résistance au roulement. C'est d'abord, et avec le plus d'importance, le frottement des fusées sur les coussinets. On a cherché à le réduire par l'emploi de coussinets à rouleaux. Mais bien que les promoteurs de ce système annoncent en sa faveur une diminution de 20 à 30 p. 100 sur l'effort produit par le frottement des fusées, on n'a que très exceptionnellement employé un tel mode de coussinets.

Ensuite il faut compter avec le frottement des bandages sur les rails. Mais, avec des rails propres, ce frottement a peu d'importance. Enfin des frottements supplémentaires sont dus aux mouvements de lacet des véhicules, mouvements qui toutefois sont très atténués avec la traction électrique.

M. du Bousquet, ingénieur en chef à la C[ie] des Chemins de fer du Nord, a déterminé expérimentalement ces différents efforts et il a trouvé, en y comprenant la résistance de l'air sur les parois (résistance bien moins considérable que celle s'exerçant sur la voiture d'avant et qui sera chiffrée plus loin) que l'on pouvait les représenter par les formules ci-après :

1.6 kg. $+ 0{,}023$ kg. $V + 0{,}0046$ kg. V^2, pour le matériel ordinaire.
$1{,}6$ kg. $+ 0{,}0045$ kg. $V + 0{,}00456$ kg. V^2, pour le matériel à bogies.

[1] Soit f le coefficient de frottement des fusées sur les coussinets, d le diamètre de la fusée, D celui de la roue. Par unité de poids l'effort dû au frottement est $e\frac{d}{D}$. Sur les chemins de fer on a généralement $f = \frac{1}{60}$ et $\frac{d}{D} = \frac{1}{11}$ d'où $e =$ 1,5 kg. par tonne.

Quelques ingénieurs sont arrivés à des résistances un peu plus élevées. C'est ainsi que les Américains emploient fréquemment la formule de Blood :

$$R = 2 \text{ kg.} + 0{,}049 \text{ kg.} + 0{,}000097 \, V^2.$$

Pour les *automotrices* ou les *locomotives* on peut avoir des chiffres un peu différents, car le rapport du diamètre des fusées à celui des roues n'est pas forcément le même que pour les voitures remorquées et certains frottements sont dus aux paliers supplémentaires des moteurs. On trouverait même des chiffres encore plus considérables, si l'on faisait intervenir la résistance des engrenages par lesquels les moteurs électriques transmettent leur mouvement aux essieux. Mais, comme le fait très bien remarquer M. Blondel, il n'y a aucune raison pour faire rentrer cette résistance dans l'effort de traction du train. Il y a d'ailleurs des cas où les moteurs sont montés sur les essieux mêmes. En réalité l'engrenage est une dépendance des moteurs et, s'il entraîne des pertes, on doit en affecter le rendement des moteurs et non le coefficient général de traction du train. Sous cette réserve on pourra assimiler la motrice ou l'automotrice à des voitures de remorque et, par suite, leur appliquer les formules de M. du Bousquet citées plus haut.

On se trouve donc, avec la traction électrique, dans une situation notablement plus avantageuse que dans le cas de la traction à vapeur, attendu que le coefficient de résistance de la locomotive à vapeur est au moins double de celui des voitures remorquées. ($R = 4\sqrt{n} + 0{,}002V^2$, n étant le nombre des essieux accouplés).

Cette supériorité de la traction électrique a été nettement mise en évidence au moment des essais de la locomotive Heilmann. Celle-ci n'a occasionné, en effet, à la vitesse de 62 kilomètres à l'heure, qu'une résistance de 5,1 kg. par tonne, alors qu'une locomotive à vapeur prenait 11,2 kg. Avec les voitures remorquées le coefficient était de 4,5 kg.

Résistance de l'air à l'avant du train. — Les auteurs ne sont pas bien d'accord pour exprimer cette résistance par une formule unique. En tout cas la pratique montre que l'on peut diminuer beaucoup cette résistance (de 40 à 50 p. 100) en donnant à l'avant de la locomotive ou de l'automotrice de tête une forme angulaire ou parabolique (locomotive Heilmann). Comme les intervalles existant entre les wagons peuvent occasionner des remous, on recommandera, également, pour les grandes vitesses, de munir les extrémités des voitures de joues en tôle, qui forceront les filets d'air à rester dans la direction du train.

Lors des essais de traction électrique à grande vitesse effectués récemment sur le chemin de fer Berlin-Zossen, on a procédé à des expériences très intéressantes pour déterminer la pression de l'air à l'avant du train à différentes vitesses. On a trouvé que, sur une surface plane d'un mètre carré, placée à l'avant du train perpendiculairement à l'axe longitudinal de la voie, la pression exercée était égale, en kilogrammes, à $0{,}065\ V^2$, en appelant V la vitesse du train en mètres par seconde[1].

En appliquant cette formule au cas d'une automotrice circulant à la vitesse de 15 mètres à la seconde (54 kilomètres à l'heure) on aura :

$$R = 0{,}065 \times \overline{15}^2 = 14{,}625 \text{ kg.}$$

Et, en supposant une surface de front de 7 mètres carrés :

$$R = 14{,}625 \times 7 = 102{,}35 \text{ kg.}$$

Pour une automotrice de 25 tonnes, la résistance serait donc d'au moins 4 kilogrammes par tonne, c'est-à-dire plus que la résistance au roulement.

Une autre formule également appliquée est $R = 0{,}088\ V^2$.

On voit que l'une et l'autre formule donnent des résistances croissant comme le carré de la vitesse. Or certains expérimenta-

[1] Pour des surfaces paraboliques la résistance a été trouvée trois fois moindre.

teurs estiment qu'au delà de 60 à 80 kilomètres à l'heure la résistance de l'air croît un peu moins vite que le carré de la vitesse. En partant des formules précédentes on pourra donc, pour des vitesses élevées, trouver des chiffres un peu trop forts; mais il vaut mieux, dans des cas semblables, pouvoir se réserver une certaine marge pour les imprévus.

Résistance occasionnée par les courbes. — M. Desdouit a trouvé que cette résistance pouvait être représentée, en kilogrammes par tonne, pour du matériel à essieux rigides du type courant des chemins de fer par la formule $500 \frac{l}{R}$, dans laquelle l est la largeur de la voie et R le rayon de la courbe [1].

On peut diminuer très notablement la résistance des courbes par l'emploi du matériel à bogies. Quelquefois, pour adoucir le passage du matériel à essieux rigides dans les courbes, on graisse la face intérieure des rails du côté du petit rayon; mais ce graissage doit être fait avec précaution, car, s'il atteint la table de roulement du rail, il risque de provoquer le patinage des voitures automotrices ou de la locomotive.

En fait l'expérience a prouvé que l'on pouvait abaisser très sensiblement au-dessous des limites usuelles le rayon des courbes, même dans le cas du matériel à essieux rigides. On devra cependant admettre en ces points un certain ralentissement de la vitesse et il sera bon de ne pas passer directement d'une courbe raide à un alignement droit, mais d'admettre soit une courbe intermédiaire soit, ce qui vaut mieux, un raccordement parabolique.

La détermination du bandage des roues, d'après le profil des

[1] Voici, pour quelques rayons, la résistance par tonne des courbes correspondantes :

Rayon de 800	0,50 kg.	par tonne ;
— 500	1,25	—
— 300	3,00	—
— 200	4,00	—
— 100	6,00	—

rails, a une importance générale sur laquelle nous avons déjà insisté; on en trouvera un bénéfice immédiat pour le passage du matériel dans les courbes. Dans un ordre d'idée analogue il faut noter que le devers, de même qu'un léger surécartement de la voie, diminuent les frottements des roues sur les rails, dans les courbes un peu raides [1].

Rampes et pentes. — Les rampes occasionnent, par tonne, une résistance supplémentaire égale à 1 kilogramme par millimètre de rampe.

Par conséquent, une rampe de 20 millimètres par mètre, qui n'a rien d'excessif en matière de traction électrique, ajoute à l'effort de traction, en palier, un effort supplémentaire de 20 kilogrammes, soit 10 à 15 fois plus.

Les déclivités du tracé ont donc, sur la résistance à vaincre, une influence capitale. Mais l'électricité permet d'en triompher facilement, d'abord parce que les moteurs électriques sont aptes à développer des efforts de traction considérables, et ensuite parce que l'on peut, si cela est nécessaire, rendre moteurs un très grand nombre d'essieux.

Sur les métropolitains on atteint facilement des rampes de 40 millimètres par mètre. Mais, comme il faut aussi se donner la possibilité de démarrer rapidement, même sur des rampes aussi accentuées, on est conduit à adopter des puissances de 4 à 5 chevaux par tonne de train.

Les pentes agissent dans le même sens que l'effort de traction du train et, au delà d'une valeur correspondant en millimètres à l'effort de traction en kilogrammes en palier, interviennent pour produire un certain travail. C'est ce travail que l'on cherche à utiliser par la *récupération.*

[1] Rappelons que la formule théorique du devers est $S = 0.008 \frac{V^2}{R}$, dans laquelle V est la vitesse en kilomètres à l'heure et R le rayon de la courbe, en mètres.

Démarrages. — Pour faire passer un train de la vitesse *o* à la vitesse V (en mètres par seconde) il faut lui communiquer une accélération moyenne $\frac{V}{2}$ et dépenser une quantité de travail égale à $\frac{1}{2} mV^2 = \frac{1}{2} \frac{P}{g} V^2$, P étant le poids du train en kilogrammes. Soit t la durée (en secondes) du démarrage et F l'effort moyen à exercer par tonne pendant le démarrage. La longueur parcourue étant égale à $\frac{V}{2} t$ on aura :

$$\frac{P}{1\,000} F \frac{V}{2} t = \frac{1}{2} \frac{P}{S} V^2$$

D'où

$$F = \frac{1\,000}{g} \frac{V}{t} = 102 \frac{V}{t}$$

Donc, indépendamment de l'effort nécessaire pour vaincre les diverses résistances analysées plus haut, il faudra, pendant la période du démarrage, exercer, par tonne, un effort supplémentaire égal à $102 \frac{V}{t}$.

Cette expression varie avec V et avec t. Si l'on a un démarrage très lent $102 \frac{V}{t}$ sera très petit et l'effort supplémentaire sera lui-même très petit. Au contraire, si l'on veut atteindre très rapidement une vitesse élevée, l'expression $102 \frac{V}{t}$ prendra une importance prépondérante.

Avec les moteurs électriques, qui offrent l'avantage de développer au démarrage un couple maximum, on se placera surtout dans ce dernier cas. Mais on peut se rendre compte, par le tableau suivant, de la valeur particulièrement élevée qui atteindra alors l'effort supplémentaire de démarrage.

Vitesse du train en kilomètres-heure.	Coefficient de traction d'après les formules de M. du Bousquet.	Effort suppl. moyen par tonne pendant le démarrage supposé effectué en 20 secondes.
—	—	—
10	1,4	14,1
15	1,5	21,2
25	1,8	35,6
35	2,2	49,5
50	2,9	70,5

Si le démarrage doit s'effectuer de plus, en courbe ou en rampe, on arrivera facilement à des efforts de traction doublant les chiffres du tableau précédent. Il y aura donc un grand intérêt à régler le profil en long d'une ligne de telle façon que les divers effets ne puissent être concomitants.

Un des grands avantages de la traction électrique est que, pendant les démarrages les plus rapides, elle permet de maintenir l'effort d'accélération à la valeur nécessaire pour que ce démarrage puisse s'effectuer dans le temps que l'on s'est assigné. Avec la traction à vapeur, au contraire, et bien que l'effort initial de démarrage puisse être très grand, on s'expose à une consommation de vapeur telle que l'effort initial ne peut se maintenir longtemps. Il y a, à ce moment, un ralentissement sensible dans l'accélération et la durée du démarrage s'en trouve augmentée.

Les chiffres suivants, relevés sur le *New-York central*, précisent bien ces résultats. Ils se rapportent aux vitesses, en kilomètres à l'heure, respectivement obtenues avec la traction électrique et la traction à vapeur. Dans le premier cas, le train était composé de deux automotrices remorquant quatre voitures et, dans le second, il comprenait une locomotive à vapeur à grande surface de chauffe et grande adhérence, pesant à peu près autant que les deux automotrices et remorquant également quatre voitures.

	Vitesse en kilomètres, à l'heure au bout de		
	10 secondes.	20 secondes.	30 secondes.
Train électrique	23,2	44	52,1
Train à vapeur	19,3	31.4	38,0

On voit, en particulier, que, dans le cas de l'électricité, pendant les 20 premières secondes du démarrage, l'accélération s'est maintenue à une valeur à peu près constante (environ 0,60 m. par seconde). Toutefois, vers la fin du démarrage, il y a forcément une diminution de l'accélération, puisque celle-ci doit s'an-

nuler. On ne peut donc pas dire que, même avec l'électricité, l'amélioration sera rigoureusement constante; mais on ne commettra pas une grande erreur en la supposant telle, parce que sa diminution ne se fait généralement sentir que pendant un temps très court.

Il y a évidemment un grand intérêt à démarrer vite, c'est-à-dire à réaliser une accélération élevée. Cependant il faudra tenir compte du désagrément qui peut résulter pour les voyageurs d'un démarrage trop brusque. Dès que l'accélération dépasse 0,80 m. par seconde, les voyageurs non encore assis doivent s'incliner de 4 à 5 degrés dans le sens de la marche. Toutefois un démarrage de 0,60 m. à 0,70 est déjà un démarrage rapide, bien que, dans certaines exploitations métropolitaines, on ait trouvé indispensable, pour relever la vitesse moyenne, de réaliser des accélérations bien plus élevées. C'est ainsi que sur le chemin de fer élevé de Liverpool, où l'accélération était primitivement de 0,44 m., on a modifié les équipements électriques, de manière à pouvoir atteindre 0,91. Parmi les raisons mises dernièrement en avant pour motiver le remplacement des locomotives du Central-London par des automotrices figurait également la possibilité, grâce à cette substitution, d'augmenter l'accélération au démarrage. Celle-ci qui était de 0,40 m. s'est élevée à 0,70 m.

Ces divers chiffres établissent les limites pratiques des accélérations. Il convient, d'ailleurs, de remarquer qu'on ne réalise une accélération élevée que moyennant un appel de courant très intense et qu'il y aura lieu de considérer si les avantages que l'on obtiendra par l'augmentation de la vitesse ne sont pas compensés par un accroissement de dépenses en énergie.

Cette question fera, un peu plus loin, l'objet d'un examen spécial.

Adhérence. — Bien que les moteurs électriques soient particulièrement aptes à développer des efforts de traction considé-

rables il faut, pour que ces efforts puissent s'exercer utilement, que l'*adhérence* dont on dispose pour le ou les essieux moteurs soit au moins égale à l'effort à développer.

Si l'adhérence est inférieure à cet effort, il y aura patinage. Non seulement alors le train ne démarrera pas, mais, par le frottement des roues, il pourra se produire des méplats sur les rails.

On peut augmenter artificiellement l'adhérence en projetant du sable sur les rails. Mais c'est un palliatif auquel on ne doit avoir recours que dans des circonstances exceptionnelles (brouillards, feuilles mortes tombant sur les rails, etc.).

L'adhérence peut être prise comme étant égale, en moyenne, à 1/7e du poids adhérent. Quand les rails seront secs et bien propres ou s'ils ont été abondamment mouillés, on pourra obtenir une adhérence supérieure.

D'autre part l'adhérence tend à augmenter avec le débit des moteurs, c'est-à-dire avec l'effort à développer, ce qui est un nouvel avantage à l'actif de la traction électrique. Ce fait s'explique par le passage du courant de retour dans les rails. Au point de contact des roues et des rails, il se produit un échauffement momentané, qui suffit pour faire disparaître toutes traces d'humidité. Cette particularité a trouvé une confirmation bien typique dans les essais qui ont été effectués avec la locomotive du tunnel de Baltimore. Celle-ci, bien que ne pesant que 96 tonnes, a pu faire démarrer 1 944 tonnes, développant, alors, un effort de traction de 30 000 kilogrammes, correspondant à une adhérence de près d'un tiers. A ce moment il passait, par chaque roue, environ 270 ampères, intensité bien suffisante pour sécher les rails.

Si une adhérence aussi élevée peut être considérée comme exceptionnelle, on peut admettre, en revanche, que très souvent on atteindra 1/6e et même un 1/5e. Dans les métropolitains souterrains, en particulier, où par suite du passage fréquent des

trains le rail est toujours bien propre et sans humidité on constate facilement des adhérences aussi élevées.

Il est clair qu'avec la traction à vapeur l'adhérence a comme limite celle de la locomotive, car celle-ci, étant une machine à feu, d'ailleurs volumineuse et encombrante, nécessite un truck spécial. Au contraire les moteurs électriques peuvent se monter sous le plancher des voitures et l'on a par suite la possibilité, en multipliant les moteurs, de rendre moteurs un très grand nombre d'essieux. Par conséquent on aura, avec la traction électrique, un moyen d'augmenter énormément l'adhérence et, en poussant même les choses à la limite, c'est-à-dire en rendant tous les essieux moteurs, on transformera en poids adhérent, la totalité du poids du train.

Il est particulièrement utile de disposer d'une grande adhérence pour les lignes à profil accidenté, puisque l'on arrive facilement, alors, à des efforts de traction quinze ou vingt fois plus considérables que l'effort en palier.

De même, pour les démarrages, qui nécessitent, comme on l'a vu, dès qu'ils sont un peu rapides, des efforts de 40 à 50 kilogrammes par tonne.

Freinages. — Avec l'air comprimé on dispose d'un système particulièrement efficace pour effectuer des freinages rapides. Ce système est d'un emploi très commode dans le cas de la traction électrique, grâce aux perfectionnements nombreux qui ont été apportés, dans ces dernières années, à l'établissement des compresseurs électriques. On peut également avoir recours au freinage électrique en sorte que si l'électricité donne, d'une part, les moyens d'atteindre des vitesses élevées, elle permet, en revanche, de passer de ces vitesses à l'arrêt absolu dans un temps extrêmement court.

Toutefois là encore, certaines limites pratiques sont à observer, afin de ne pas incommoder les voyageurs. Il est à remarquer,

cependant, qu'au moment des arrêts, les voyageurs sont généralement assis et qu'à l'inverse de l'accélération de démarrage qui est, dès le début, maxima et surprend par conséquent, l'accélération retardatrice n'atteint son maximum que quelques instants après que le freinage a commencé. Aussi admet-on généralement des accélérations retardatrices supérieures d'un tiers environ aux accélérations de démarrage.

Comme freinages extra-rapides, nous citerons ceux du chemin de fer élevé de Liverpool qui s'effectuent à raison de 1,25 m. par seconde. Mais, en général, on ne dépasse que rarement 0,90 m. à 1 mètre.

Puissance. — Connaissant, d'après les formules et coefficients établis précédemment, les diverses valeurs de l'effort de traction nécessaire pour remorquer un train sur une ligne donnée et avec un service donné, on en déduit la puissance nécessaire à chaque instant, en chevaux-vapeur, en multipliant l'effort de traction F (en kilogrammes) par la vitesse V (en mètres par seconde) et divisant par 75. On aura :

$$P \text{ (en chevaux)} = \frac{F\,V}{75} \text{ (en kilogrammètres).}$$

et comme 1 cheval = 0,736 kilowatt on aura

$$P = \frac{F\,V}{75} \times 0{,}736 \text{ (en kilowatts).}$$

Il faudra, pour avoir la puissance totale consommée par le train, ajouter aux chiffres ainsi obtenus la puissance absorbée d'abord par le fonctionnement des appareils de transmission aux roues de l'effort moteur (engrenages, chaînes, bielles, etc...), puis par le moteur lui-même (rendement)[1].

Cette puissance totale variera dans de grandes limites (démarrages, rampes, courbes, etc.) et, naturellement les moteurs

[1] Le rendement des engrenages et celui des moteurs sont donnés par le constructeur.

devront être tels qu'ils puissent supporter la puissance maxima ainsi calculée.

En réalité ce n'est pas cette puissance maxima qui déterminera la puissance normale à donner aux moteurs, car ces derniers, s'ils sont bien construits, pourront supporter passagèrement des surchages de 40 à 50 p. 100. Mais on se trouvera bien, néanmoins, d'adopter des moteurs sensiblement plus forts que ceux qui conviendraient strictement, pour le régime normal. D'abord on se donnera ainsi la possibilité de remorquer, le cas échéant, un plus grand nombre de voitures. Et ensuite on réduira sensiblement les frais d'entretien, malgré la petite diminution de rendement provenant de ce que les moteurs travailleront moins souvent à pleine charge. Nous verrons d'ailleurs plus loin, en étudiant le rendement des moteurs électriques, que, même pour des diminutions importantes de la charge, le rendement se maintient toujours à des valeurs extrêmement élevées.

Les moteurs les plus fréquemment employés pour la traction des chemins de fer ont une puissance de 100 à 200 chevaux. On arrive facilement à loger un moteur de 100 chevaux sous une voiture à voyageurs. Mais on n'a plus assez de hauteur pour un moteur de 200 chevaux et l'emploi de tels moteurs suppose implicitement l'adoption de locomotives électriques. A la vérité comme, dans ce cas, la question d'encombrement du moteur n'existe plus, on pourrait avoir recours à des moteurs d'une puissance supérieure. Mais on risque alors d'avoir des appareils peu maniables, ce qui compliquerait l'entretien et les réparations.

Quand, sur une ligne alimentée par une usine unique, plusieurs trains sont en circulation, il peut se faire que les puissances maxima requises par ces trains viennent à concorder, auquel cas l'usine devra faire face à une demande de courant instantanément très élevée. Bien que les machines jouissent, à ce point de vue, d'une certaine élasticité, on devra arranger les horaires de telle façon que de tels écarts ne puissent se produire. Ils seront

d'autant moins à craindre qu'il y aura plus de trains en service, une puissance moyenne tendant alors à s'établir; mais, dans une exploitation peu chargée, il faudra généralement compter avec des variations considérables de la consommation et c'est alors que l'on pourra adjoindre très efficacement au matériel ordinaire des usines des batteries d'accumulateurs (batteries-tampon), dont le rôle est de corriger justement les écarts de la consommation, en absorbant de l'énergie quand la puissance demandée par les trains est faible et en en restituant à la ligne, quand les machines risquent de devenir insuffisantes (voy. page 112).

Consommation d'énergie. — Le calcul de l'énergie consommée par les trains se déduit de la puissance en kilowatts, en tenant compte des différentes périodes pendant lesquelles les puissances instantanées, calculées comme il a été dit plus haut, sont appliquées.

a) *Consommation par tonne-kilomètre.* — Pour comparer entre elles les différentes exploitations on a pris l'habitude de ramener l'énergie consommée par un train à la *tonne-kilomètre.* Mais encore devra-t-on indiquer si la consommation ainsi envisagée est celle strictement absorbée par le train ou si elle comprend le rendement de la ligne. Si celui-ci est de 10 p. 100, cas usuel, la consommation à l'usine sera égale aux 10/9e de la consommation mesurée sur le train.

La consommation d'un train par tonne-kilomètre varie beaucoup selon qu'il s'agit d'un train à grande ou moyenne vitesse et suivant que l'on envisagera une exploitation de grande ligne ou une exploitation métropolitaine.

Si l'on considère un train de 150 à 200 tonnes circulant, avec des arrêts assez espacés, sur une ligne ne présentant que des déclivités ordinaires, à la vitesse moyenne de 35 à 40 kilomètres à l'heure, la consommation sera d'environ 30 watts-heure par tonne kilomètre.

Comme exemple d'une telle consommation nous citerons le *chemin de fer électrique de Wannsee à Berlin*, qui parcourt 12 kilomètres avec quatre arrêts en 20 minutes 1/2, soit une vitesse moyenne de 35 kilomètres à l'heure. Le train pèse, en moyenne, 200 tonnes et comporte deux voitures motrices à trois essieux et trois moteurs de 75 chevaux et huit voitures de remorque. Au démarrage la puissance fournie par l'usine est de 900 kilowatts, pour tomber à 184 kilowatts, quand le train a atteint

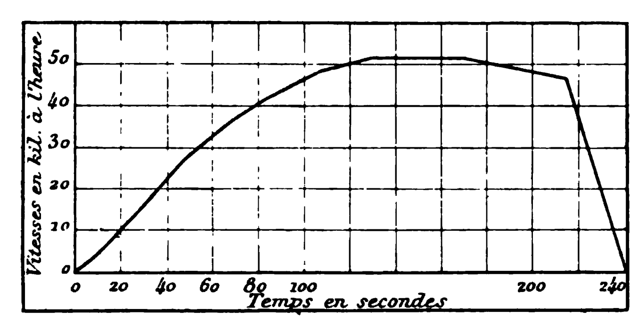


Fig. 295. — Courbe des vitesses en fonction du temps, sur le chemin de fer de Wannsee à Berlin.

sa vitesse. Les variations de cette dernière sont données en fonction du temps, entre deux arrêts, par la figure 295. On voit que la vitesse maxima atteint 52 kilomètres; puis, le courant est coupé et le train, en vertu de sa force vive, continue à marcher à vitesse légèrement décroissante, jusqu'au moment où l'on applique les freins, et où la vitesse décroît alors avec rapidité, pour descendre, en 35 secondes, jusqu'à zéro.

La consommation s'élève, dans ces conditions, à 6000 watts-heure pour le train complet, par kilomètre, soit 30 watts-heure par tonne-kilomètre.

Avec les trains lourds du tunnel de Baltimore (trains de 1700 tonnes remorqués par une locomotive électrique de 87 tonnes, à 4 moteurs de 350 chevaux chaque) la consommation atteint 34 watts-heure par tonne-kilomètre. Pour montrer

comment une telle locomotive se comporte, au point de vue de la vitesse et de la consommation, nous donnons (fig. 296) les courbes de la vitesse et des ampères consommés (courant continu à 700 volts) pour une des locomotives remorquant seulement 152 tonnes. Comme on le voit l'accélération se maintient jusqu'à

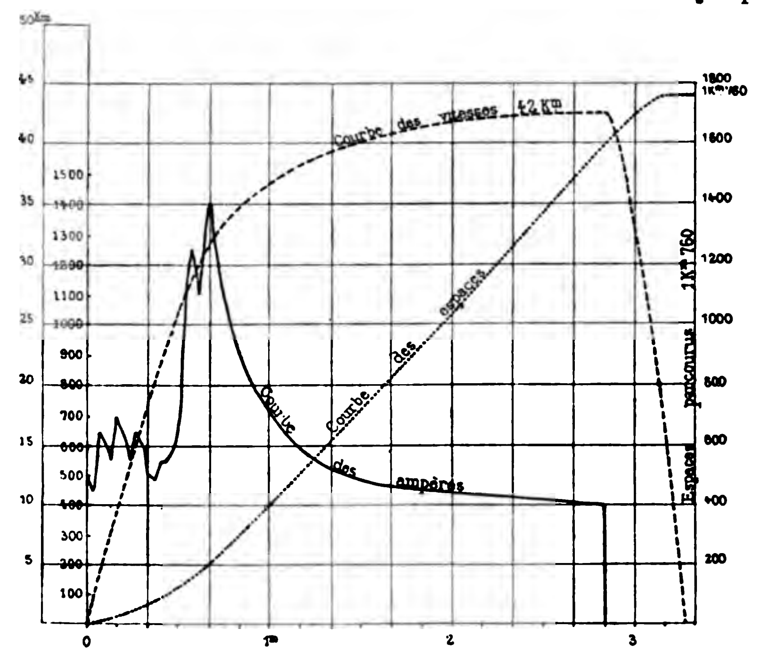


Fig. 296. — Courbe des vitesses et des ampères consommés, pour un train lourd.

la vitesse de 30 kilomètres à l'heure à une valeur à peu près constante (0,40 m. par seconde par seconde), puis la courbe s'adoucit pour atteindre la pleine vitesse (42 kilomètres à l'heure) et l'on effectue le freinage en moins de 27 secondes. La courbe des ampères montre d'abord deux redans bien caractérisés correspondant à la mise en série des moteurs et à la mise en parallèle, puis elle redescend, après que le gros effort de démarrage a été fait, pour tomber à zéro au moment du freinage.

L'exemple ci-dessus montre qu'à vitesses égales la consomma-

tion d'un train lourd n'est pas plus élevée que celle d'un train léger. Si, au contraire, on considère un train marchant non plus à des vitesses de 35 à 40 kilomètres, mais à des vitesses d'express, la consommation sera notablement plus forte. C'est ainsi qu'elle atteint 50 watts-heure sur la ligne de Milan à Varèse (vitesse moyenne de 75 kilomètres à l'heure).

Dans une exploitation métropolitaine la rapidité et la fréquence

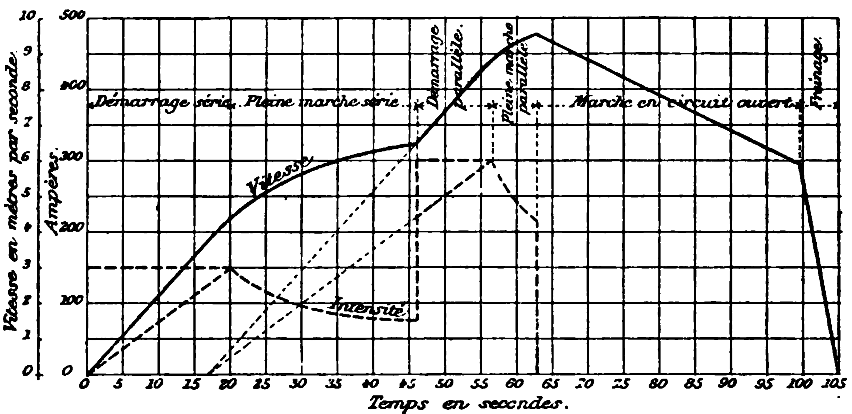


Fig. 297. — Courbe des vitesses et des ampères consommés, dans le cas d'une exploitation métropolitaine.

des démarrages influent beaucoup sur la consommation par tonne-kilomètre. La figure 297 montre quelles sont les courbes de la vitesse et de l'intensité sur le métropolitain de Paris[1]. Le démarrage se fait pour ainsi dire en deux temps, correspondant à la marche avec moteurs en série et avec moteurs en parallèle. L'accélération initiale n'est en outre que de 0,21 m. par seconde, par seconde, en sorte que l'on n'atteint la pleine vitesse, soit 35 kilomètres à l'heure, qu'au bout de 60 secondes. On coupe alors le courant et on laisse la vitesse décroître jusqu'à 20 kilomètres, moment où l'on applique les freins. La consommation

[1] *Bulletin de la Société Internationale des Electriciens*, février 1902. Communication de M. Détroyat.

par tonne-kilomètre est, dans ces conditions, de 49 watts-heure.

Sur le Central-London la consommation n'est que de 28 watts-heure par tonne-kilomètre. Mais, comme nous l'avons déjà expliqué, le profil en long de la ligne a été déterminé de manière à ce que les démarrages se fassent en pente.

Lorsque, sur un métropolitain, on veut réaliser une vitesse sensiblement supérieure aux vitesses usuelles (20 à 22 kilomètres à l'heure) on augmente notablement la consommation d'énergie. C'est ainsi que sur le *Liverpool Overhead Railway*, où, pour lutter contre les tramways, on a adopté récemment des moteurs pouvant donner une accélération de 0,91 par seconde par seconde et permettant de parcourir la totalité de la ligne à la vitesse commerciale de 31 kilomètres à l'heure, on a constaté une consommation de 85 watts-heure par tonne-kilomètre.

b) *Consommation par place-kilomètre.* Si la consommation par tonne-kilomètre est intéressante à connaître, en ce sens qu'elle donne une idée générale de la façon dont est utilisée l'énergie, elle ne constitue pas une donnée suffisante pour permettre d'apprécier immédiatement les avantages de l'électricité appliquée au transport des voyageurs, surtout quand on veut rapprocher les sommes payées par les voyageurs pour leur transport, de la dépense de courant nécessaire pour les transporter.

On considérera alors, avec avantage, la *dépense d'énergie par place-kilomètre*.

Il est clair que ce coefficient variera beaucoup avec le mode de traction adopté, c'est-à-dire selon que le train sera remorqué par des locomotives ou qu'il sera mis en mouvement par des automotrices. La locomotive constitue un poids mort qu'il faut bien accepter avec la traction à vapeur, mais dont on peut se passer avec la traction électrique. Si, pour des trains lourds, démarrant lentement et ne circulant qu'avec une vitesse modérée, la locomotive est jusqu'à un certain point admissible, elle

devient, en revanche, extrêmement onéreuse pour une exploitation comportant des démarrages rapides et fréquents.

Considérons, par exemple, une exploitation métropolitaine avec trains de 150 tonnes. D'après ce que l'on a vu plus haut, on sera amené facilement à appliquer à ce train un effort de traction de 60 à 80 kilogrammes par tonne. Soit P (en tonnes) le poids de la locomotive électrique qui serait nécessaire pour remorquer le train et supposons que tous les essieux de cette locomotive soient moteurs. La valeur la plus réduite de P sera donnée par la formule :

$$(P + 150)\,80 = \frac{P \times 1\,000}{7}.$$

D'où

$$P = 85 \text{ tonnes.}$$

Ainsi donc la locomotive devra peser plus que la moitié du poids du train et les dépenses d'énergie se trouveront majorées d'au moins 50 p. 100.

Sur le *Central London* où l'on avait, pour le début de l'exploitation, adopté des locomotives, on a pris le parti de leur substituer des automotrices. La consommation par tonne-kilomètre ne s'est pas beaucoup abaissée (26,2 watts-heure au lieu de 27,5), mais on a gagné 20 p. 100 sur la consommation par place-kilomètre (10 watts-heure par place-kilomètre au lieu de 12,5).

Si, à ce point de vue, on compare la traction électrique à la traction à vapeur, on trouvera des écarts encore plus considérables.

C'est ainsi que les essais du *New-York Central*, dont il a été parlé plus haut, ont donné 22 watts-heure, par place-kilomètre avec l'électricité et 36 watts-heure avec la vapeur.

Ces deux derniers chiffres sont indiqués au point de vue de leur comparaison, mais on remarquera que le chiffre de 22 watts-heure correspondant à la traction par automotrices doit être considéré comme élevé. Cela tient à ce que les Américains ont une tendance bien connue à employer du matériel lourd.

Nous avons vu plus haut que, sur le Central-London, on ne dépensait que 10 watts-heure.

Sur le *Waterloo and City*, avec trains de 204 places pesant 100 tonnes, on atteint 31 watts-heure par tonne-kilomètre, soit 15 watts-heure par place-kilomètre.

Enfin sur le métropolitain de Paris, la consommation est d'environ 13 watts-heure, en comptant comme places les nombreuses places debout qui y sont autorisées, mais que l'on ne rencontre qu'en bien petit nombre sur les métropolitains étrangers.

Réduction de la consommation. — On a pu voir, par les chiffres précédemment donnés, que les trains électriques étaient, en somme, de gros consommateurs d'électricité. Alors que pour les tramways on est habitué à des consommations moyennes d'une vingtaine d'ampères à 500 volts, on atteint facilement, sur une ligne de chemin de fer, de 2 à 300 ampères.

Dès lors on conçoit que l'on doive s'ingénier à diminuer d'aussi fortes consommations, attendu que, même si le coefficient de réduction est faible, l'économie pourra, d'une façon absolue, être assez sensible.

Pour les chemins de fer à longs parcours on trouvera les éléments de cette économie dans un tracé bien étudié, une distribution électrique judicieuse et l'emploi d'un matériel ne comportant qu'un coefficient de traction peu élevé (matériel à bogies, wagons spécialement combinés pour vaincre la résistance de l'air, etc.). La récupération de l'énergie dans les pentes ne sera pas non plus à dédaigner. Malheureusement les moteurs les plus fréquemment employés, c'est-à-dire les moteurs en série pour courant continu à 6 ou 700 volts ne se prêtent pas à la récupération. Avec les moteurs à courants triphasés cette récupération se fait automatiquement et c'est une des raisons que l'on fait valoir pour appliquer cette catégorie de moteurs aux lignes de montagne. Avec les moteurs à courant continu excités en dérivation, la récu-

pération est également possible et on l'utilise sur certaines lignes à crémaillère. Enfin le système à intensité constante convient également pour la récupération, mais à l'heure actuelle il n'existe pour ainsi dire qu'à l'état théorique.

Quand les démarrages et les arrêts sont fréquents, comme c'est le cas pour une exploitation métropolitaine, le problème se

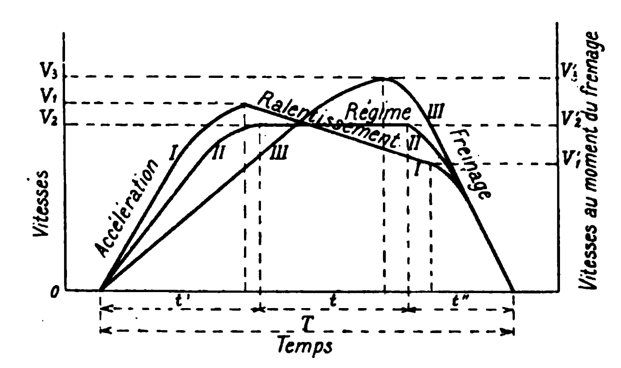


Fig. 298. — Démarrages lents et rapides.

pose d'une façon différente, l'énergie consommée par les démarrages devenant prépondérante.

Or, à ce point de vue, deux éléments interviennent : le mode même du démarrage et ensuite l'accélération.

Généralement le démarrage se fait avec des rhéostats, et ceux-ci, consommant de l'énergie, constituent une première perte qu'il serait bien intéressant d'éviter. A défaut on a pu, par le *couplage série parallèle*, l'atténuer très sensiblement, l'un des moteurs servant, pendant la première moitié du couplage, de résistance à l'autre. Mais on devra se garder de se priver trop tôt de cette résistance économique. Autrement dit il ne faudra passer du couplage-série au couplage en parallèle, que lorsque l'accélération aura tendance à diminuer, puisque la production du couple, à valeur égale, prendra deux fois plus de courant avec les moteurs en parallèle qu'avec les moteurs en série.

Quant à l'accélération, il y aura toujours intérêt à la prendre élevée. Soit, par exemple, un parcours à effectuer en un temps donné T. Prenons les temps comme abscisses et les vitesses comme ordonnées (fig. 298). On pourra effectuer le parcours avec une forte accélération (courbe I) suivie d'un ralentissement que l'on obtiendra en coupant le courant et laissant le train marcher en vertu de la vitesse acquise, puis d'un freinage énergique. Une deuxième solution consistera au contraire à démarrer moins vite (courbe II), sauf à maintenir le train en vitesse pendant un certain temps. Enfin on pourra démarrer encore plus lentement (courbe III); mais, pour pouvoir effectuer le parcours dans le temps donné, on devra maintenir l'accélération pendant une plus longue période, sauf à commencer le freinage plus tôt.

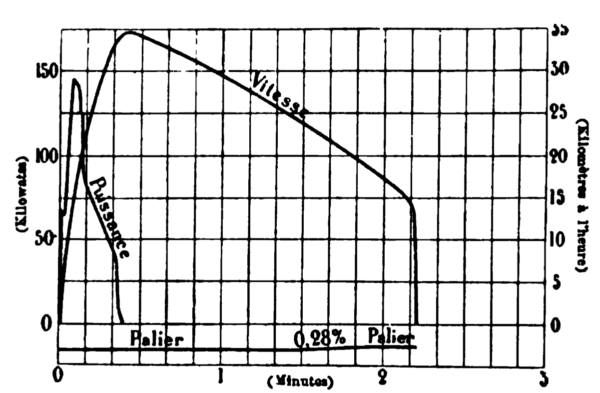


Fig. 299. — Puissance absorbée dans le cas d'un démarrage rapide.

Cette dernière méthode est de beaucoup la moins économique attendu que l'énergie consommée pendant le démarrage (laquelle est proportionnelle au carré de la vitesse atteinte) est plus grande que dans les cas I et II. Et comme cette énergie doit-être aussitôt absorbée par les freins, elle se trouve mal utilisée. La courbe II est plus admissible. Mais généralement c'est la courbe I qui donnera les meilleurs résultats.

Des démarrages aussi rapides sont tout à fait facilités par l'emploi, dans un train, de plusieurs voitures motrices (système Sprague, système Thomson-Houston.). La figure 299 se rapporte à un train de quatre voitures motrices (système Sprague), effec-

tuant un parcours donné en 2 minutes 12 secondes. La vitesse a été portée rapidement à 55 kilomètres à l'heure, puis on a coupé le courant et le train a ralenti jusqu'à 15 kilomètres à l'heure et l'on a freiné très énergiquement. La figure 300 montre, au contraire, le même parcours effectué pendant le même temps, mais avec une accélération moindre, quoique plus prolongée, et un freinage plus anticipé. Or, dans le premier cas, la consommation a

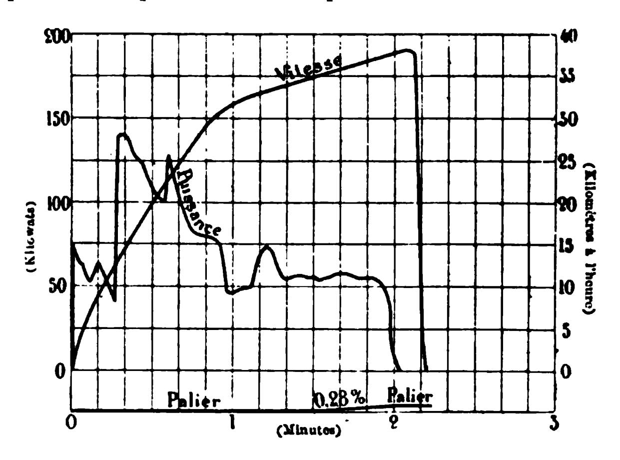


Fig. 300. — Puissance absorbée dans le cas d'un démarrage lent.

été de 0,47 kilowatt-heure pour 2,40 kilowatts-heure dans le second.

On conçoit combien, avec des démarrages aussi rapides que ceux qui sont nécessaires sur une ligne métropolitaine, il serait intéressant de pouvoir récupérer, pendant les freinages, une partie de l'énergie consommée pendant les démarrages. Malheureusement peu de systèmes permettent d'obtenir un tel résultat. Cependant, avec le mode de couplage appliqué par MM. Ganz et Cie pour les moteurs à courants triphasés du chemin de fer de la Valteline (couplage en cascade), la récupération devient possible pendant toute la période où la vitesse décroît du synchronisme au demi-synchronisme. C'est un avantage sérieux, que MM. Ganz et Cie avaient fait valoir, quand ils ont proposé leur système pour le

métropolitain de Londres et les experts l'ont mis en relief d'une façon très nette dans leur rapport.

La traction électrique et la traction à vapeur. — Nous avons déjà fait remarquer les avantages spéciaux de la traction électrique sur la traction à vapeur, au point de vue de l'adhérence, du mouvement du matériel dans les voies et des démarrages.

Il y a d'autres avantages sur lesquels il faut insister. D'abord on rappellera que dans une locomotive à vapeur le couple moteur varie à chaque instant avec la position de la manivelle, l'effort minimum étant facilement inférieur d'un tiers à l'effort maximum. Or un démarrage sûr est limité par l'effort maximum et, d'autre part, il ne faut pas que les roues patinent sous l'action de l'effort maximum. Par conséquent, à couple de démarrage égal, on doit, avec les locomotives à vapeur, atteindre un poids supérieur d'au moins 50 p. 100 à celui d'une locomotive électrique[1]. Aussi arrive-t-on facilement, dans le cas de la vapeur, à un poids de 100 à 110 kilogrammes par cheval (tender compris), alors qu'il suffit de 66 kilogrammes pour une locomotive électrique et de 33 kilogrammes pour une automotrice. D'autre part le poids adhérent d'une locomotive à vapeur dépasse rarement 50 p. 100 du poids total, alors que, dans le cas d'une locomotive ou d'une automotrice électriques, tout le poids peut être transformé en poids adhérent.

Comparons maintenant les chaudières. Dans une installation électrique les chaudières sont à poste fixe et travaillent dans des conditions régulières, tout en ne pouvant brûler que du charbon de qualité inférieure. Au contraire, les chaudières des locomotives à vapeur doivent brûler de la houille de bonne qualité, avec un rendement inférieur de 20 p. 100, au moins, à celui d'une chaudière fixe. Il est clair, d'autre part, que les frais d'allumage et de conservation de la pression sont bien plus élevés avec une

[1] *Énergie électrique*, 11 mai 1901. M. Cserhati.

chaudière de locomotive à vapeur qu'avec une chaudière d'usine.

Enfin non seulement la vapeur coûte plus cher dans le premier cas, mais la consommation de vapeur par cheval-heure se trouve augmentée du fait du mauvais rendement de l'appareil moteur. D'abord on sait que la consommation de vapeur par cheval-heure d'une locomotive varie beaucoup avec l'admission. Ensuite le rendement de la meilleure locomotive, travaillant dans les meilleures conditions, est naturellement inférieur à celui d'une bonne machine fixe de 1 000 à 1 500 chevaux, même sans surchauffe.

Il est vrai qu'avec la traction électrique il faut faire intervenir le rendement des génératrices, de la ligne et des moteurs. Mais, tout compte fait, l'économie de charbon en faveur de la traction électrique sera encore de 20 à 25 p. 100.

La mise en route, l'entretien sont encore bien facilités avec la traction électrique. Enfin l'obtention de très grandes vitesses est chose simple avec l'électricité, alors qu'elle présente des difficultés bien connues avec la vapeur.

De cette discussion, bien que sommaire, résulte la nécessité, pour les exploitants, d'envisager attentivement la question de la transformation de la traction, au moins pour un certain nombre de lignes. Certes il faut faire entrer en ligne de compte les dépenses de transformation et rapprocher les charges nouvelles qu'elles imposeront du gain que procurera la traction électrique. Mais, après étude, surtout si l'on adopte un système de distribution approprié, on sera bien souvent étonné de voir que la traction électrique pourrait être avantageusement appliquée. On peut même dire qu'il y a déjà beaucoup de lignes pour lesquelles une transformation immédiate s'impose, étant admis, bien entendu, que d'autres considérations n'ont pas à intervenir et qu'on se trouve seulement en présence d'un problème purement industriel, consistant à tirer le meilleur parti possible d'un système existant.

CHAPITRE VIII

AUTOMOTRICES ÉLECTRIQUES

Principaux types d'automotrices. Automotrices à essieux rigides. Automotrices à bogies. Automotrices accouplées. Système Sprague. Système Thomson-Houston. Système Westinghouse. Système Auvert. Automotrices à courants triphasés à basse tension. Automotrices à courants triphasés à haute tension. Automotrices à grande vitesse. Voitures à accumulateurs. Accessoires des voitures automotrices.

Principaux types d'automotrices. — Les automotrices électriques conviennent très bien pour la traction des chemins de fer. Il est bon, cependant, de faire observer que la traction d'un train par une automotrice unique n'est pas toujours réalisable, en raison du peu d'importance du poids adhérent. Mais la possibilité que l'on a de manœuvrer, d'une seule voiture, plusieurs automotrices à la fois, permet d'intercaler dans un train autant d'automotrices qu'il faut pour éviter tout patinage. En poussant les choses à la limite on peut dire que rien n'est plus facile que de rendre le train entier automoteur. Il suffira alors d'employer des moteurs de faible puissance, ce qui pourra avoir un avantage, dans certains cas.

Nous distinguerons d'abord les *automotrices à deux essieux* et les *automotrices à bogies*.

Le premier type, d'un usage si fréquent sur les lignes de tramways, est assez rare dans les exploitations de chemin de fer. Il peut à peine convenir pour des trains très légers. Indépendamment de la question d'adhérence, il faut faire intervenir également le passage du matériel dans les courbes, passage qui, pour

un même écartement d'essieux, est plus pénible pour une automotrice que pour une voiture de remorque.

En Amérique, les voitures automotrices sont presque toujours à bogies et on a une tendance de plus en plus marquée à rendre les quatre essieux moteurs. L'expérience prouve qu'il y a, en somme, économie dans l'entretien du matériel, quand la puissance motrice est en léger excès. D'autre part, la manœuvre de quatre moteurs se fait avec autant de facilité que dans le cas de deux moteurs et avec des appareils identiques. Enfin les réparations peuvent s'effectuer sans immobilisation du matériel, un bogie avarié pouvant être très facilement remplacé par un bogie de réserve.

La prise de courant est assurée soit par un trolley ou un archet (conducteurs aériens) soit — ce qui est le plus fréquent — par un frotteur (3e rail). Dans ce dernier cas des précautions doivent être prises pour que le frotteur reste bien constamment sur le 3e rail, même au passage dans les courbes. Il faut donc que ce frotteur soit suspendu à la partie de la voiture qui subisse le moins de déviations en ces points particuliers. Avec des essieux rigides on est conduit à placer le frotteur très près des boîtes à huile, c'est-à-dire dans le voisinage d'une masse métallique à la terre, ce qui peut compromettre l'isolement. Avec une automotrice à bogies, au contraire, on se borne à relier les deux boîtes à huile par une traverse en bois créosoté, ou paraffiné, au milieu de laquelle on suspend simplement le frotteur. En raison du faible empattement des bogies, le milieu de la traverse ne subit que des déviations insignifiantes et le frotteur maintient toujours son contact avec le 3e rail.

Qu'il s'agisse d'une voiture à essieux rigides ou d'une automotrice à bogies, il est toujours indispensable de prévoir une ossature très robuste. Les efforts intenses qui sont mis en jeu, au moment des démarrages, justifient pleinement une telle précaution.

Dans un ordre d'idées analogue on a parfois muni les moyeux

des roues (exemple, au Manhattan Railway) d'un renflement sur lequel est calé l'engrenage que commande le pignon du moteur. On a trouvé cette disposition préférable à celle, plus usuelle, qui consiste à monter l'engrenage directement sur l'essieu. On évite ainsi la torsion des essieux, accident qui peut se produire, parfois, avec des moteurs très puissants.

Nous n'avons rien de spécial à dire des roues et des essieux et l'on se conformera, pour le choix de ces organes, aux règles généralement admises en matière de chemin de fer. Nous ne saurions trop insister, cependant, sur l'utilité que présente la détermination relative des profils des rails et des bandages. M. Bernheim, ingénieur au corps des Mines, a très justement appelé l'attention des ingénieurs sur ce point spécial, faisant valoir, comme résultat certain, une usure moins rapide des roues et des rails et un effort de traction moins considérable. Le profil du bandage doit « envelopper » celui du rail, en évitant les doubles tangences, qui ne peuvent que provoquer une usure anticipée des points de contact.

Avec la traction électrique, la conicité des bandages n'a pas toujours paru nécessaire, étant donnée la suppression des efforts alternatifs que produisent les pistons des locomotives à vapeur (métropolitain de Berlin).

Dans ces dernières années une certaine faveur s'est manifestée, surtout en Amérique, pour les roues en fonte, avec bandages aciérés. Ces roues sont assez économiques; mais elles ne sont pas toujours d'une qualité bien uniforme et ont une certaine tendance à s'user inégalement, produisant, sous l'action d'un freinage énergique, des plats qui obligent à passer les bandages à la meule. A ce dernier point de vue, le rétablissement du bandage, selon son profil primitif, est plus difficultueux qu'avec une roue à bandages rapportés. Nous n'allons pas toutefois jusqu'à dire qu'il faut écarter le système « de plano » et préférer les roues à bandages. C'est, avant tout, une question de fabrication et de fabricant.

Automotrices à essieux rigides. — Ce système a été appliqué sur le métropolitain de Paris (fig. 301). Afin d'augmenter l'adhérence on a muni la voiture d'un double châssis. Un premier qui s'appuie par l'intermédiaire de ressorts sur les boîtes à huile et

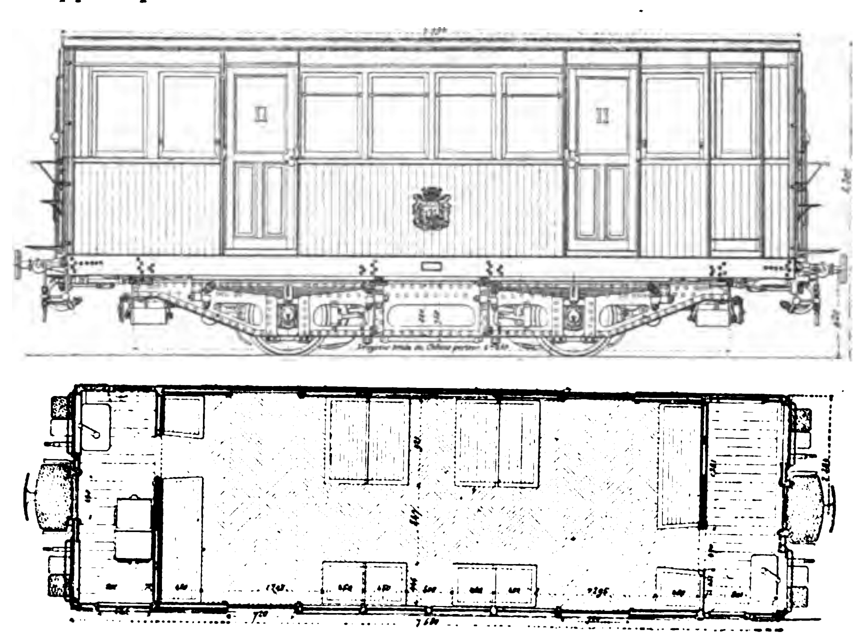


Fig. 301. — Automotrice à essieux rigides du chemin de fer métropolitain de Paris avec équipement Westinghouse. Plan et élévation.

constitue, à proprement parler, le châssis moteur. Un second, qui repose sur le premier par l'intermédiaire de tampons en caoutchouc.

Les moteurs, du type Westinghouse, sont au nombre de deux et attaquent les essieux par un jeu d'engrenages à simple réduction[1]. Le pignon du moteur a 265 millimètres et la roue dentée, calée sur l'essieu, 630 millimètres. Les moteurs sont à excitation en

[1] Nous avons donné, page 342, leur caractéristique.

série; leur vitesse normale est de 450 tours par minute et leur puissance de 100 chevaux.

D'une part, ces moteurs reposent sur les essieux par deux paliers; d'autre part, ils sont suspendus à une traverse du premier châssis par un fort boulon soutenant le moteur à l'arrière (suspension par le nez).

L'automotrice, que représentent en plan et élévation la figure 301 et en coupe la figure 302, est à deux loges de wattman. Sa longueur est de 7,796 m. et l'écartement des essieux de 3 mètres. Dans chaque loge se trouve un contrôleur et les appareils de sécurité ordinaire. Une des loges contient, en outre, un compresseur électrique pour la manœuvre des freins[1].



Fig. 302. — Coupe transversale.

Les résistances sont suspendues à l'avant et à l'arrière du premier châssis. Par suite du mouvement du train elles se trouvent ventilées naturellement.

La prise de courant se faisait, au début, par un frotteur suspendu aux boîtes à huile. Nous avons signalé plus haut les inconvénients d'une telle disposition. Aussi a-t-on substitué à ce mode de suspension un autre dispositif consistant à soutenir le frotteur, près de la boîte à huile, par une traverse en bois, prenant appui sur les deux boîtes à huile.

La figure 303 représente une voiture analogue, avec moteurs Thomson-Houston, employée sur le même réseau. Le détail du truck est donné par la figure 304. Les moteurs, au nombre de deux, ont chacun une puissance de 140 chevaux. Ils sont également suspendus par le nez et attaquent les essieux par un engrenage à simple réduction (rapport 1 à 2,7). Le moteur avec ses

[1] La Cie doit agrandir ces loges, ainsi que celles des voitures nouveau modèle (fig. 303) et les rendre incombustibles.

engrenages pèse 2 300 kilogrammes. Le frotteur est suspendu à une traverse en bois, fixée par une console sur la boîte à huile.

Dans les automotrices du chemin de fer du Fayet à Chamonix

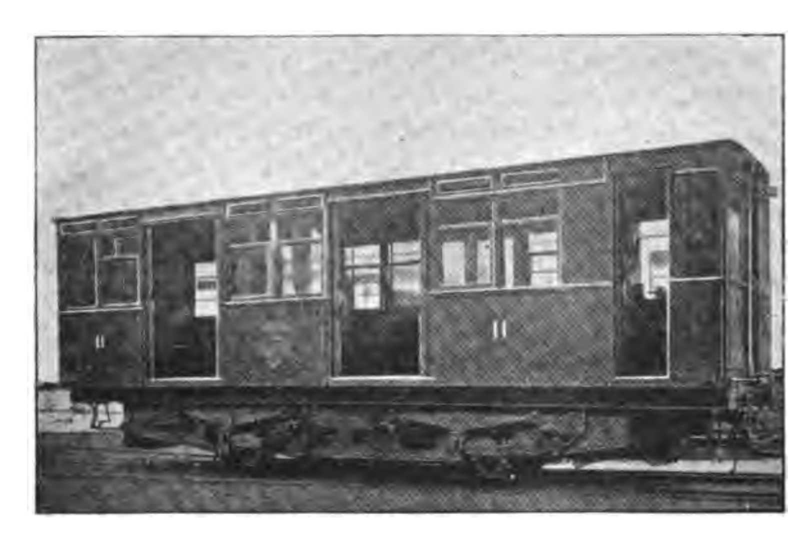


Fig. 303. — Automotrice à essieux rigides du chemin de fer métropolitain de Paris avec équipements Thomson-Houston.

(fig. 305) on a dû, en raison du faible écartement de la voie (1 mètre), loger les moteurs, en long, sous le plancher de la voi-

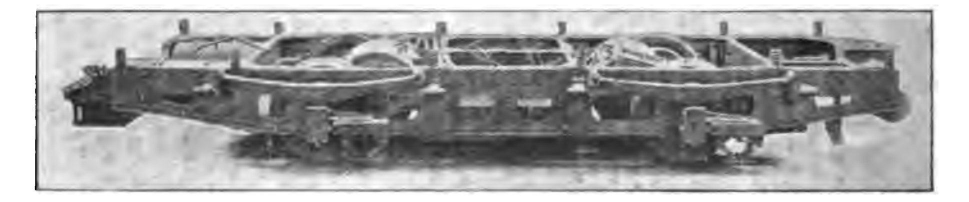


Fig. 304. — Truck.

ture. La figure 306 montre l'emplacement que ces moteurs occupent dans le châssis. L'attaque des essieux se fait par des engrenages coniques, réduisant la vitesse dans le rapport de 4 à 1. La

roue dentée montée sur l'essieu n'est pas calée sur ce dernier. Elle l'entraîne par des attaches élastiques, ce qui donne beaucoup de douceur aux démarrages et diminue notablement l'usure des dents.

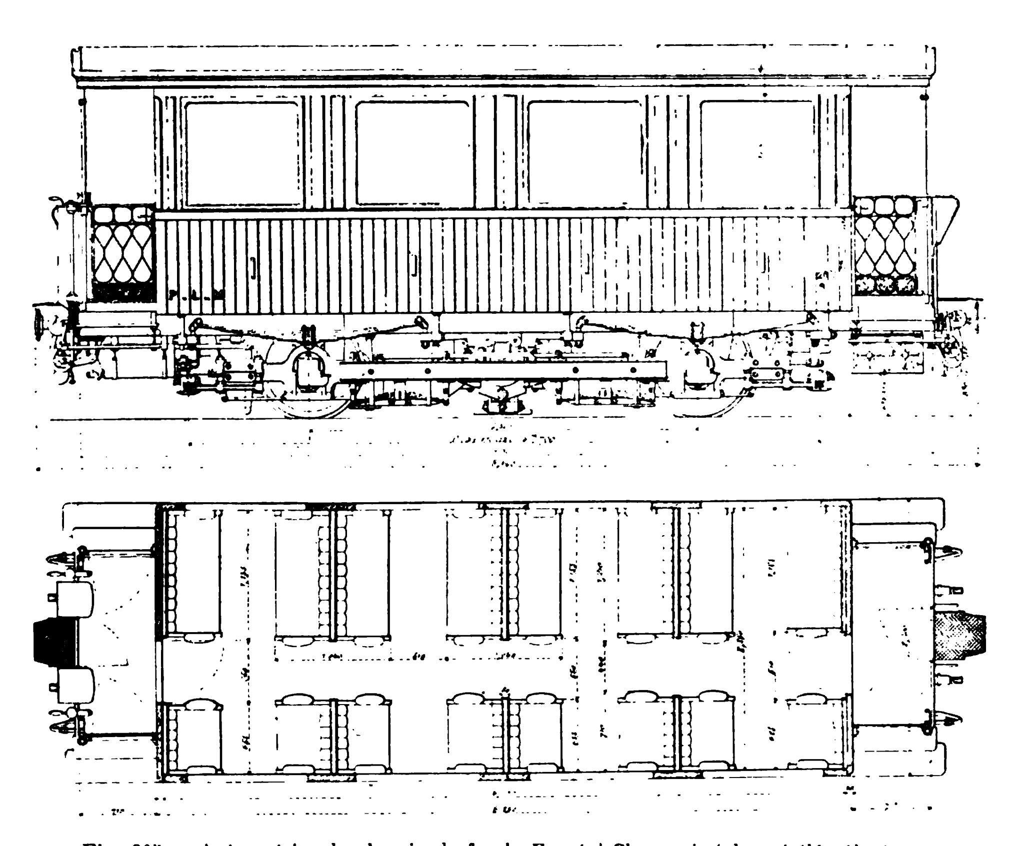


Fig. 305. — Automotrice du chemin de fer du Fayet à Chamonix (plan et élévation).

Chaque moteur a une puissance de 65 chevaux, pouvant en développer facilement le double. Ce moteur, dont les figures 307 et 308 font voir les dispositions intérieures et extérieures, est supporté par des consoles boulonnées sur la partie inférieure de la carcasse et qui prennent appui sur des ressorts fixés aux lon-

gerons. Deux consoles, avec paliers embrassant l'essieu, complè-

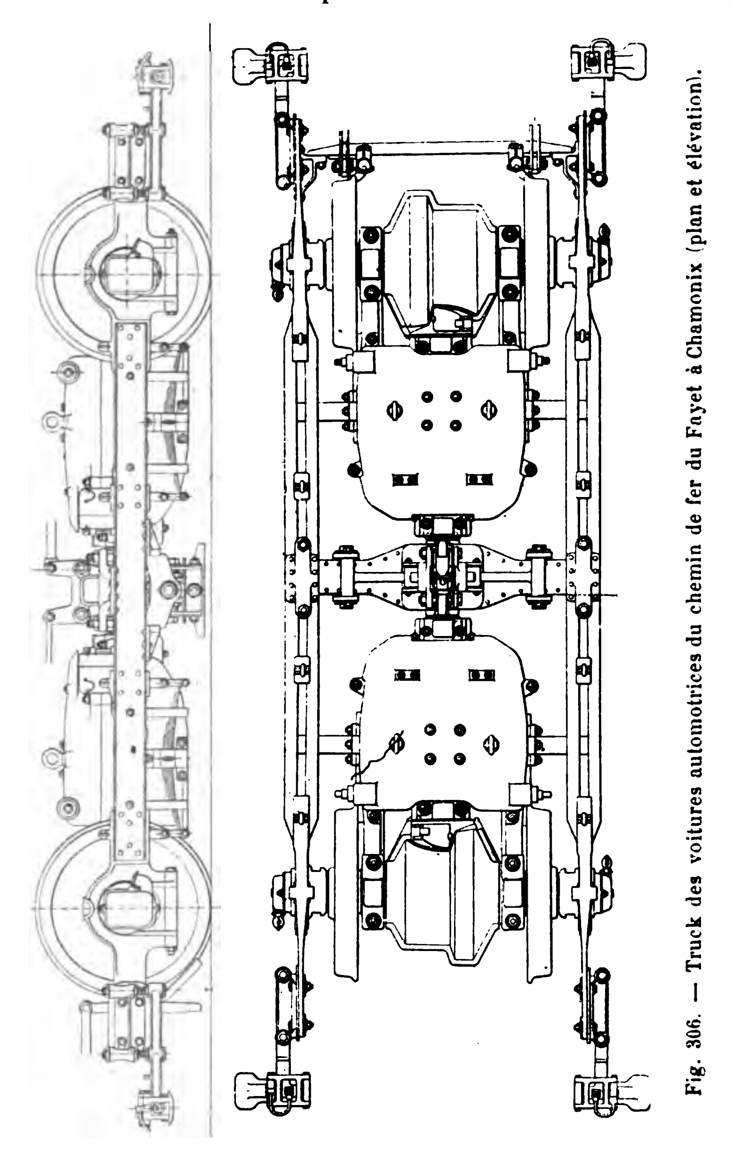


Fig. 306. — Truck des voitures automotrices du chemin de fer du Fayet à Chamonix (plan et élévation).

tent la suspension. Le châssis est en acier. Il est très fortement

contreventé en son milieu, point où il sert d'appui à un frein à sabot agissant sur un rail de freinage, placé au milieu de la voie.

Sur le chemin de fer de Wannsee à Berlin les automotrices sont

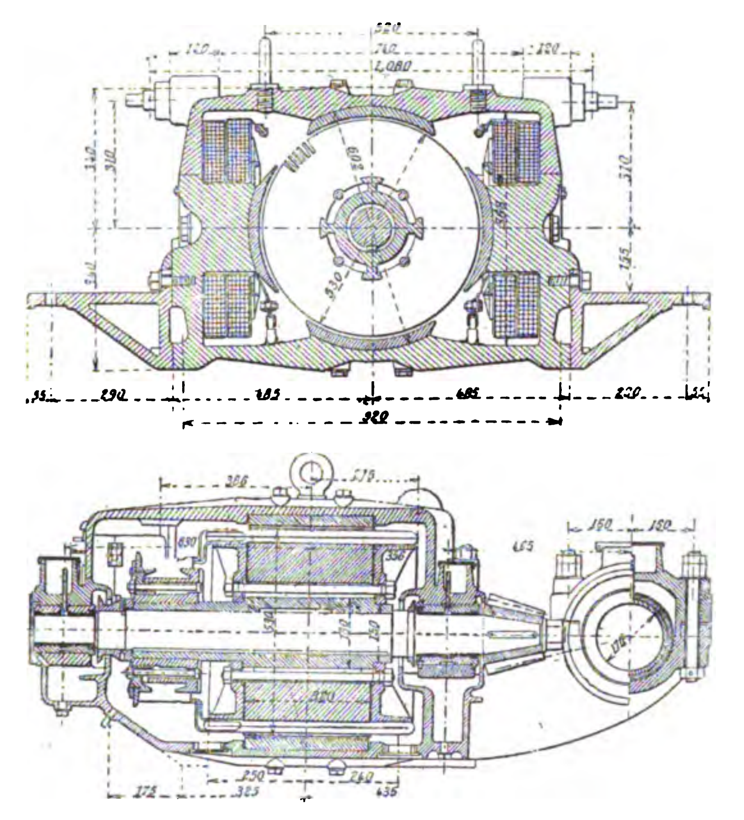


Fig. 307. — Moteur des automotrices du chemin de fer du Fayet à Chamonix (coupes transversale et longitudinale).

à 3 essieux, munis chacun d'un moteur de 50 chevaux [1] (fig. 309). Il n'y a plus de transmission par engrenages, les induits des moteurs étant directement calés sur l'essieu. Quant à l'inducteur, il est suspendu de part et d'autre de l'essieu par des res-

[1] *Revue générale des chemins de fer*, mars 1902.

sorts prenant appui sur les longerons (fig. 310). Les trois moteurs de la voiture sont manœuvrés en même temps. Chaque train

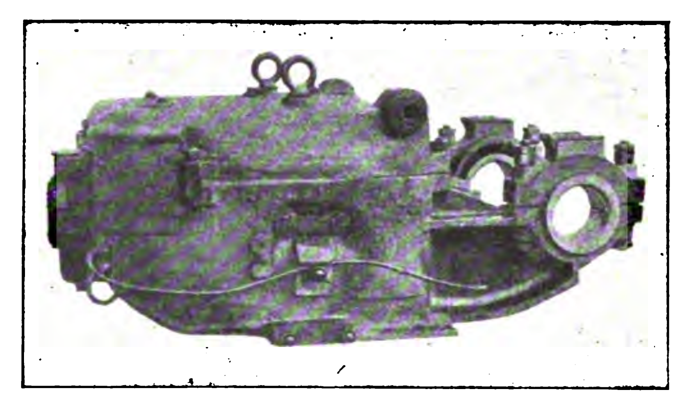


Fig. 308. — Vue d'ensemble du moteur.

comporte une voiture motrice à l'avant et une à l'arrière. Au

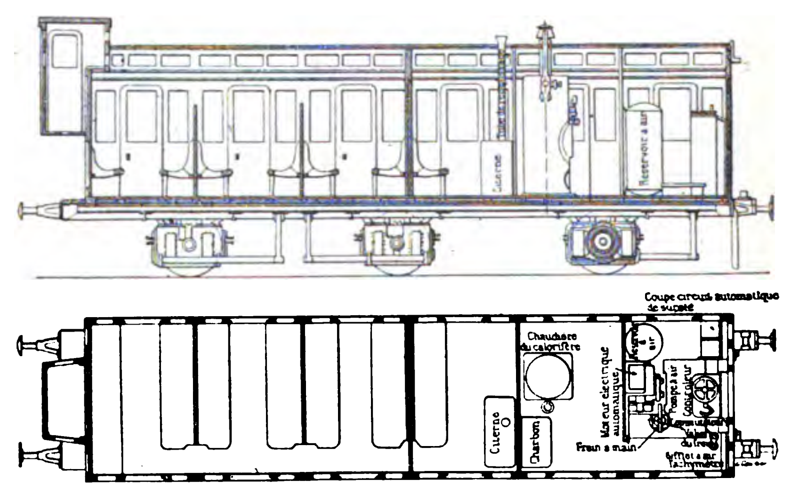


Fig. 309. — Automotrice du chemin de fer de Wannsee à Berlin. Plan et coupe longitudinale.

démarrage on met en série les deux groupes de 3 moteurs. Puis, ensuite, tous les moteurs fonctionnent en parallèle. Le nombre

de voitures remorquées par train est de 8 et un train complet

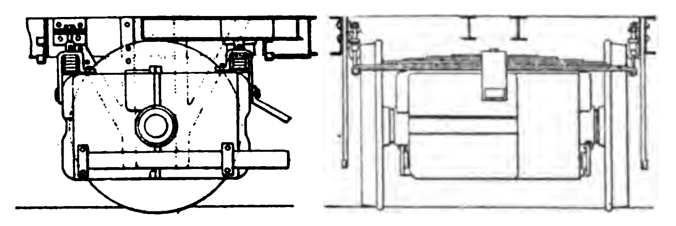


Fig 310. — Suspension des moteurs.

pèse, en charge, 220 tonnes dont 33 tonnes pour chaque voiture motrice.

Automotrices à bogies. — Dans ce système, de beaucoup le plus appliqué, les moteurs sont montés dans les bogies, entre les essieux et la traverse qui soutient le pivot de la caisse. On pourrait, à la vérité, combiner des bogies avec moteurs extérieurs; mais le bogie tendrait alors à prendre du balancement et le premier système, qui constitue un ensemble plus ramassé et, partant, plus robuste, est certainement préférable.

Pour que les moteurs puissent être logés entre les essieux et le pivot il est nécessaire que l'écartement des essieux atteigne, pour des puissances d'une centaine de chevaux, de 1.80 à 2 mètres. Mais on ne descend guère au-dessous, sur les chemins de fer, afin de donner à l'ensemble du bogie une bonne stabilité. Avec des bogies de 1,80 à 2 mètres d'empattement on peut, d'ailleurs, passer dans des courbes extrêmement raides (50 à 60 mètres de rayon). Bien entendu, il faut alors disposer les voies de telle façon que la saillie du matériel, dans ces parties spéciales, laisse toujours, par rapport aux obstacles fixes ou au matériel circulant sur les voies adjacentes, les intervalles prescrits par les règlements. Avec de longues voitures (16 à 18 mètres) les déviations peuvent être considérables et c'est pour en atténuer l'importance que l'on arrondit souvent les angles saillants des voitures.

Le moteur peut attaquer les essieux soit directement, par montage direct de l'induit sur l'essieu, soit par engrenages avec simple réduction. D'après les considérations générales émises précédem-

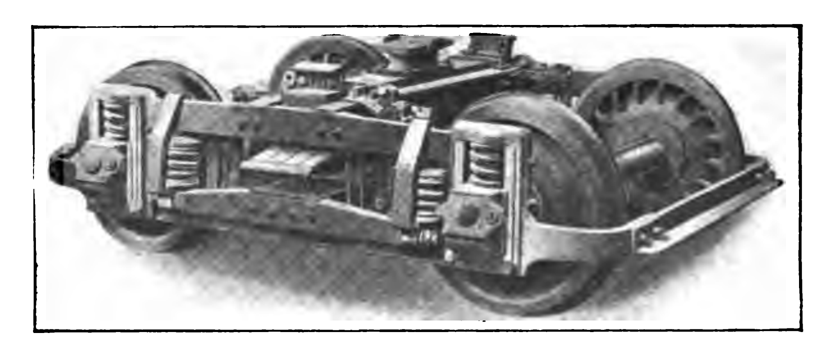


Fig. 311. — Truck pour traction electrique.

ment, cette dernière disposition doit être et est effectivement la plus fréquente. Dans ce cas le moteur prend appui sur l'essieu

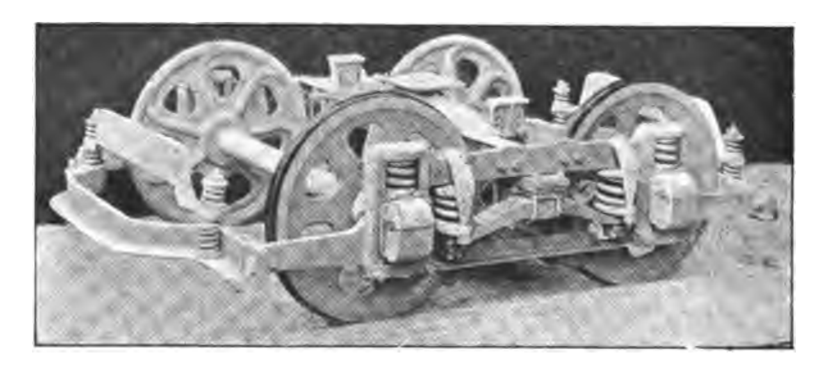
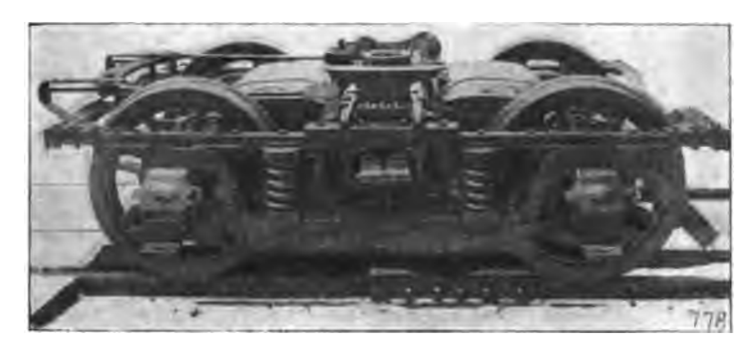


Fig. 312. — Truck pour voiture légère.

par deux paliers et il est soutenu, à l'arrière, soit par deux pattes appuyant sur une traverse par l'intermédiaire de ressorts, soit par un boulon unique. Quelle que soit la suspension il faut toujours s'arranger pour pouvoir déboulonner facilement la car-

casse, afin de dégager l'induit. Le collecteur se visite ordinairement par le haut, en soulevant un couvercle ménagé dans la carcasse.

Les Américains ont poussé très loin l'étude des bogies, qu'ils



Vue de face.



Vue de coté.

Fig. 313. — Truck avec châssis supérieur amovible.

appliquent maintenant à leurs tramways et à fortiori à leurs chemins de fer électriques.

Nous représentons, par la figure 314, un truck spécialement disposé pour la traction électrique (truck Brill). Le châssis de ce truck, comme la traverse supportant le pivot, sont montés sur

ressorts, ce qui donne une grande douceur de roulement. Les deux traverses servant de guide à la traverse de pivot forment également soutien pour les moteurs électriques. Entre les deux boîtes

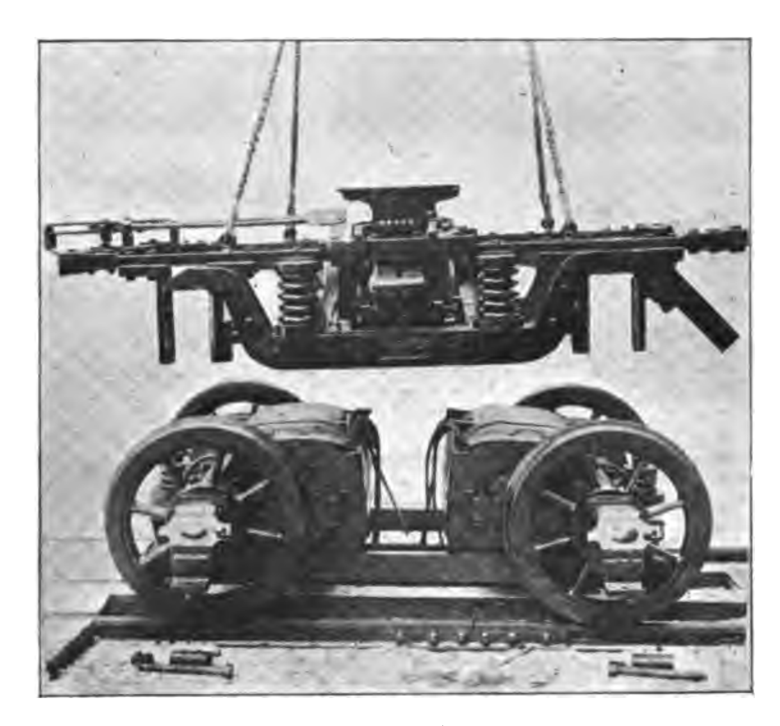


Fig. 314. — Truck avec châssis supérieur amovible (le châssis est enlevé et les moteurs sont dégagés).

à huile et s'appuyant sur une saillie venue de fonte avec la boîte, règne une traverse en bois, à laquelle on fixe le frotteur électrique. Un truck analogue, mais moins puissant, est représenté par la figure 312.

Dans un autre modèle (fig. 313 et 314) on s'est précoccupé de pouvoir dégager rapidement les moteurs et l'on a fait le truck en deux parties, avec châssis supérieur amovible. De tels avantages sont précieux pour une grande exploitation et ils permettent de

visiter périodiquement les moteurs, dont toutes les parties sont alors accessibles.

La figure 315 concerne le truck employé sur le Manhattan Railway (New-York). La distance des essieux, d'axe en axe, est

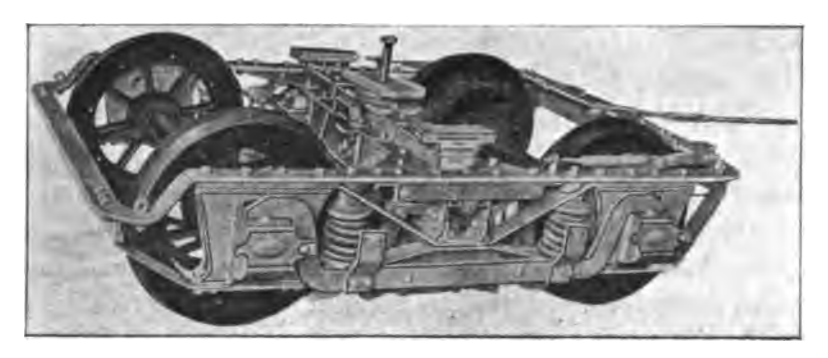


Fig. 315. — Truck du Manhattan Railway.

de 2 mètres, le diamètre des roues de 92 centimètres. Le poids, sans les moteurs, est de 5 165 kilogrammes et, avec les deux moteurs, de 9 275 kilogrammes. Ce truck est construit par la maison

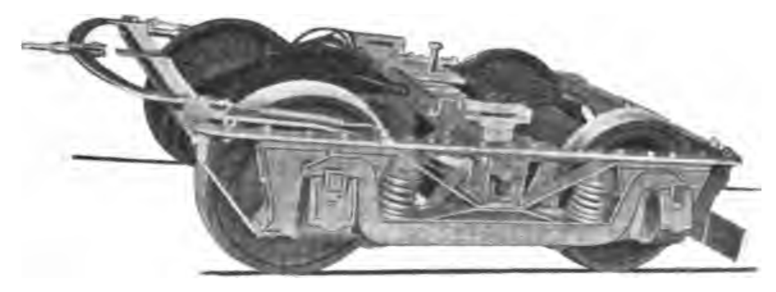


Fig. 316. — Truck du Aurora. Elgin and Chicago Railway.

Peckham. Un détail caractéristique est l'élargissement du moyeu à l'emplacement de l'engrenage réducteur, élargissement qui évite la torsion de l'essieu, même sous l'action de démarrages très intenses. Nous avons, précédemment, appelé l'attention sur cette particularité.

Enfin un truck du même système, mais pour grandes vitesses (100 kilomètres à l'heure) est représenté par la figure 316. Ce type est en usage sur le Aurora, Elgin and Chicago Railway. Le diamètre des roues est de 1 mètre et l'écartement des essieux de 2,12 mètres. Avec ses deux moteurs le truck pèse 9 790 kilogrammes.

La *caisse* des automotrices à bogies ne présente rien de très spécial. A l'une des extrémités se trouve le compartiment du wattman, qu'il convient de séparer complètement du public. Ce compartiment doit, cependant, être facilement accessible de l'intérieur de la voiture, afin que le chef de train puisse se porter rapidement au secours du conducteur, si celui-ci devenait subitement incapable de conduire sa voiture. Une bonne précaution à prendre est de ménager dans la paroi de séparation une partie vitrée suffisamment large pour que l'on puisse bien voir le conducteur.

Lorsque la voiture doit revenir en arrière, sans passer par une raquette ou un triangle américain, il faut munir la caisse de deux compartiments de manœuvre l'un à l'avant, l'autre à l'arrière.

Une disposition intéressante à signaler et qui a été prise sur le Central-London, consiste à rendre les compartiments de manœuvre complètement incombustibles. Toutefois une telle précaution est surtout à recommander pour un chemin de fer souterrain, en raison des accidents graves que pourrait alors provoquer un incendie[1]. Il n'est pas impossible, en effet, malgré les soins avec lesquels on procède ordinairement au câblage, que des courts circuits ne se produisent par suite du dénudage accidentel de certains fils. On ne saurait trop recommander, à ce sujet, d'éviter le passage des câbles sur des angles saillants. D'une manière générale il sera bon de placer les câbles électriques dans des gaines en bois ignifugé et de les abriter, à la traversée des masses métalliques, par des fourreaux isolants.

[1] L'incendie d'un train, sur le Métropolitain de Paris, a coûté la vie à 80 voyageurs.

L'équipement électrique d'une voiture comporte, indépendam-

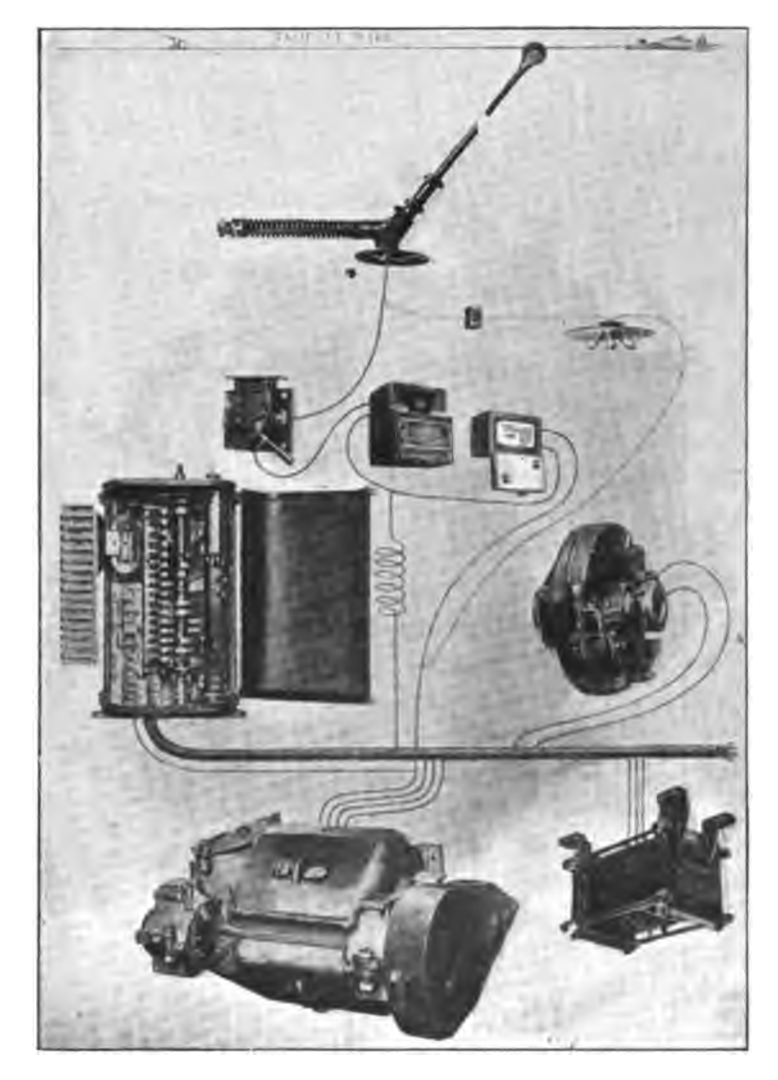


Fig. 317. — Différentes parties de l'équipement électrique d'une voiture.

ment des moteurs, des résistances, du câblage et du contrôleur,

un disjoncteur automatique, un interrupteur à plomb fusible et, quand la voiture prend son courant sur une ligne aérienne, un parafoudre.

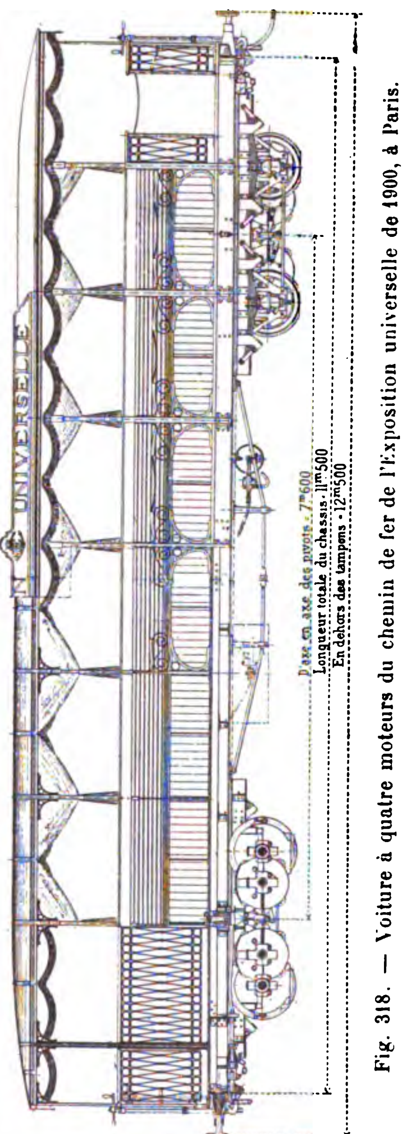


Fig. 318. — Voiture à quatre moteurs du chemin de fer de l'Exposition universelle de 1900, à Paris.

Des prises de courant sont en outre ménagées, avant le disjoncteur automatique, pour l'éclairage des voitures et l'alimentation électrique du compresseur à air (fig. 317).

On peut, avec un contrôleur ordinaire à deux moteurs, assurer très facilement la manœuvre d'un équipement à quatre moteurs, tout en profitant des avantages du couplage série-parallèle. Il suffit, alors, comme on l'a indiqué précédemment, de coupler les moteurs par groupes de deux. Soient, par exemple, les moteurs 1, 2, 3 et 4. Après avoir traversé la résistance de démarrage R, le courant se divisera en deux et traversera d'une part, 1 et 2 montés en série et d'autre part, 3 et 4, montés également en série. La mise en parallèle s'obtiendra en mettant dans chaque groupe les moteurs en parallèle.

La figure 318 montre une voiture ainsi équipée, pour voie d'un mètre (chemin de fer de

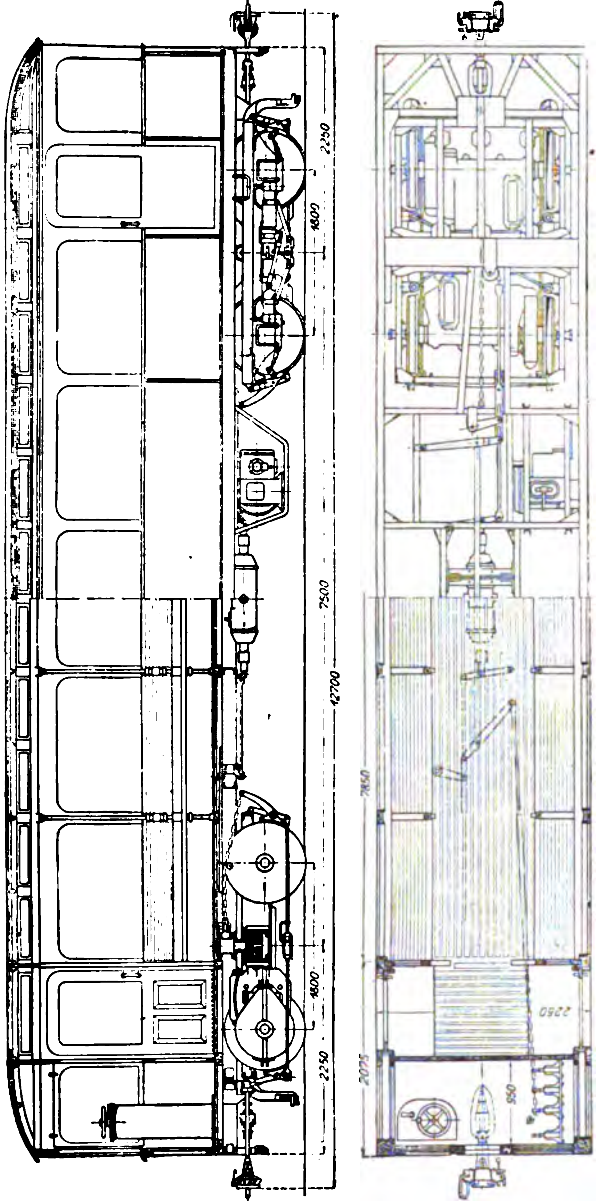


Fig. 319. — Voiture automotrice du chemin de fer métropolitain de Berlin (plan et élévation).

l'Exposition de Paris, en 1900). Malgré l'étroitesse de la voie on avait pu, entre les roues, loger convenablement des moteurs de 40 chevaux avec leurs engrenages réducteurs.

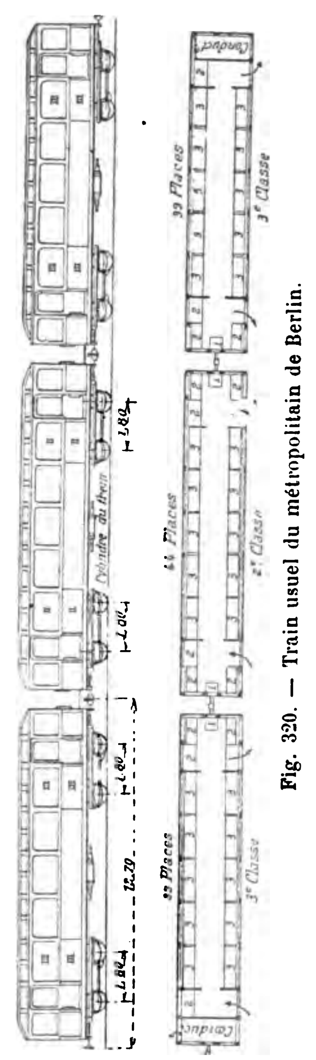


Fig. 320. — Train usuel du métropolitain de Berlin.

Sur le métropolitain de Berlin les voitures automotrices, bien qu'étant à bogies, ne possèdent que 3 moteurs, savoir : deux moteurs sur l'un des bogies et un moteur seulement sur le deuxième. Mais on s'est réservé la possibilité de monter un 4e moteur. Les trains se composent de 3 voitures, dont la voiture d'avant et la voiture d'arrière motrices.

Les moteurs sont de 70 chevaux ; ils attaquent les essieux par un jeu d'engrenages à simple réduction. La manœuvre se fait selon le système de groupement indiqué plus haut, pour le chemin de fer de Wannsee ; c'est-à-dire que les 3 moteurs de chaque voiture motrice forment un groupe que l'on considère, au point de vue de la marche série-parallèle, comme un seul moteur. Pour la marche-arrière on n'emploie que les moteurs de la voiture de tête.

La figure 319 montre la disposition intérieure et extérieure d'une voiture automotrice et la figure 320 donne, en élévation et plan, la vue d'un train complet. Les voitures sont accouplées entre elles sans tampons, n'étant réunies que par les barres d'attelage. La longueur de chaque voiture est de 12,70 m., la largeur de caisse de 2,26 m. et la hauteur du sommet des wagons au-dessus



Fig. 321. — Automotrice américaine pour service interurbain.

du rail de 3,18 m. L'écartement des bogies est de 7,50 m. et leur



Fig. 322. — Disposition intérieure des sièges.

empattement de 1,80 m. Les voitures automotrices pèsent, en

charge, 26 tonnes. La prise de courant se fait par un frotteur, dont nous avons fait connaître précédemment les dispositions et qui existe aussi bien sur les voitures automotrices que sur les voitures remorquées[1].

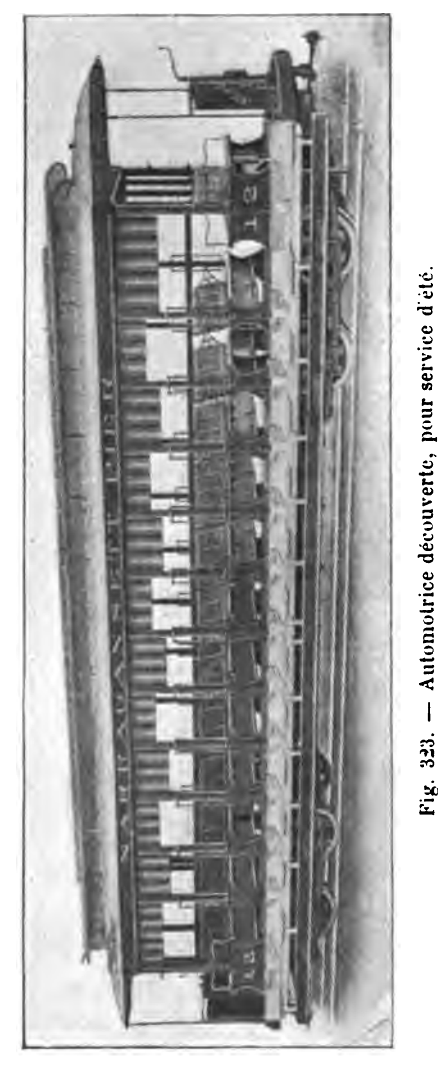


Fig. 323. — Automotrice découverte, pour service d'été.

Les dispositions intérieures et extérieures des automotrices électriques varient avec le service qu'elles ont à effectuer. On distingue généralement les voitures pour service interurbain, les voitures pour grandes lignes et les voitures pour métropolitains.

Le premier type est intermédiaire entre des voitures pour tramways et des voitures pour chemin de fer. Il est très usité en Amérique où les chemins de fer électriques suburbains se sont répandus, dans ces dernières années, avec une intensité extraordinaire. Les accès se font par les extrémités (fig. 321). A l'intérieur, les sièges sont presque toujours perpendiculaires à l'axe longitudinal, avec couloir central (fig. 322). Il y a deux places par siège, prenant chacune environ 0,50 m. soit 1 mètre pour chacun

[1] La compagnie exploitante, dans le but d'augmenter la vitesse commerciale de ses trains, a procédé à des essais de train Sprague.

des sièges. Avec un couloir de 0,80 m. et une épaisseur de paroi, pour la caisse, de 0,08 m. on arrive à une largeur totale de 2,96 m.

La longueur des voitures est de 12 à 15 mètres.

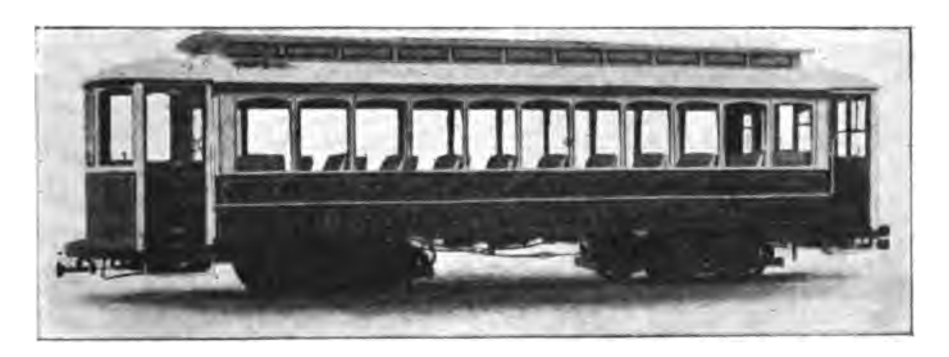


Fig. 324. — Voiture semi-convertible pour service d'hiver et service d'été.

On emploie des voitures fermées en hiver et des voitures découvertes en été (fig. 323). Parfois on a combiné des voitures fermées,

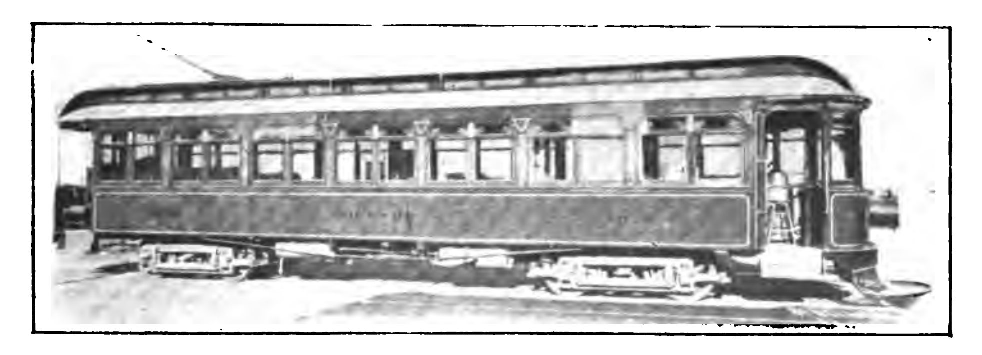


Fig. 325. — Voiture automotrice de luxe pour service interurbain.

à parois amovibles et susceptibles, par suite, de se transformer partiellement ou totalement en voitures découvertes pendant la belle saison (voitures convertibles et semi-convertibles) (fig. 324).

Si la ligne le comporte on n'hésite pas, non plus, à mettre en

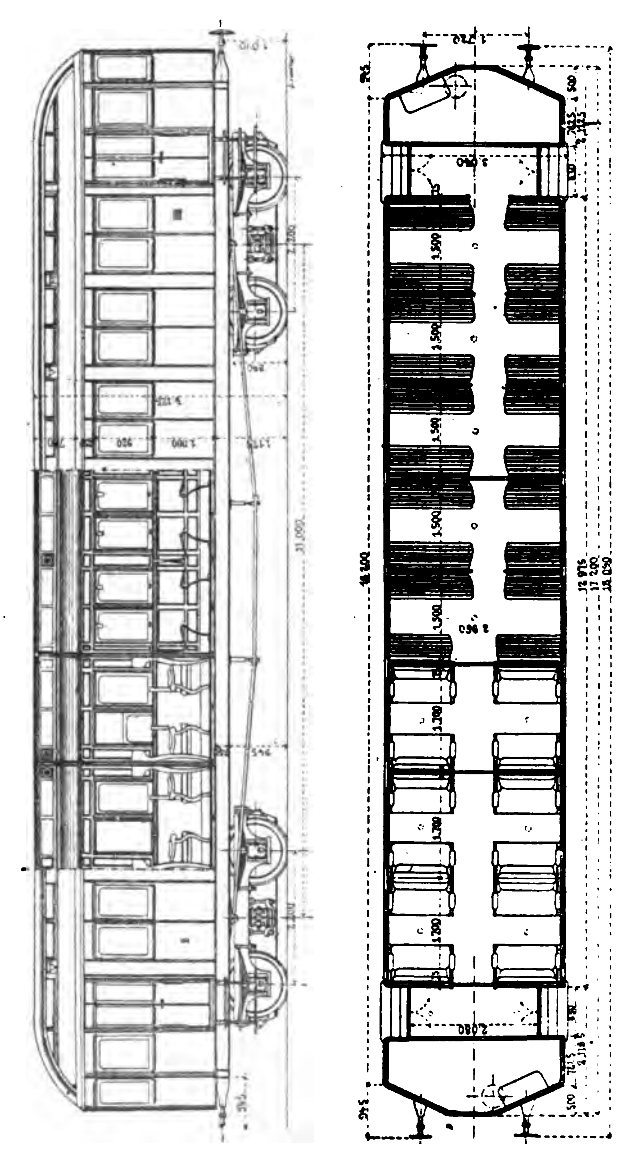


Fig. 326. — Automotrice du chemin de fer de Milan à Varèse (plan et élévation).

service de vraies voitures de luxe (parlor car) (fig. 325) par ana-

logie avec ce qui se fait sur les chemins de fer, où un matériel spécial est souvent nécessaire, les trains ne comportant théoriquement qu'une seule classe.

Pour les grandes lignes la disposition intérieure qui convient le mieux est également la disposition avec couloir longitudinal. Toutefois on a intérêt à augmenter la longueur des voitures, dont l'aspect devient plus confortable. La figure 326 représente une des



Fig. 327. — Automotrice du chemin de fer de Milan à Varèse (vue d'ensemble).

automotrices du chemin de fer de Milan à Varèse. La voiture a, entre tampons, une longueur de 18,090 m. La largeur intérieure est de 2,96 m. Une partie de la voiture est affectée à la 1re classe, une autre à la 2e et la plus grande partie à la 3e classe. Pour la 3e classe on a rétréci le couloir longitudinal en le désaxant légèrement, de manière à gagner une place assise par rangée de sièges.

La voiture est à deux loges de wattman; les extrémités sont abattues suivant des pans coupés, ce qui diminue la résistance de l'air. Le poids total de l'automotrice est de 43 tonnes.

L'équipement, constitué par 4 moteurs, de 165 chevaux, Thomson-Houston (type GE. 55), permet de réaliser avec l'automotrice

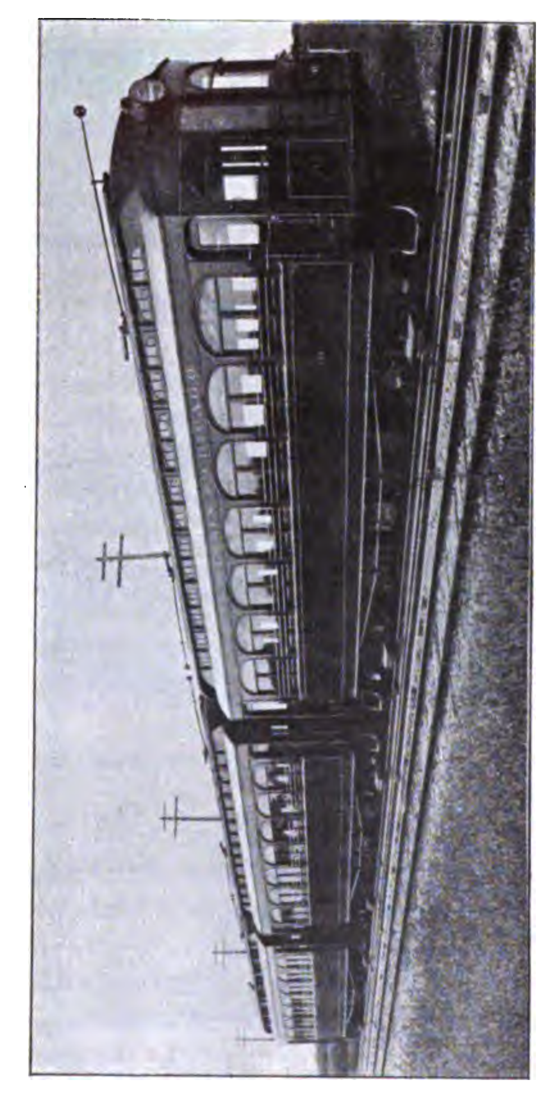


Fig. 328. — Automotrice du Aurora Elgin and Chicago Railway.

et une voiture remorquée de 30 tonnes une vitesse de 100 kilomètres à l'heure[1].

[1] Dans son rapport aux actionnaires, à l'assemblée générale du 27 novembre 1902

Des automotrices analogues (fig. 328) sont employées sur le Aurora Elgin and Chicago Railway. Nous avons indiqué précédemment comment était constitué le truck de ces automotrices.

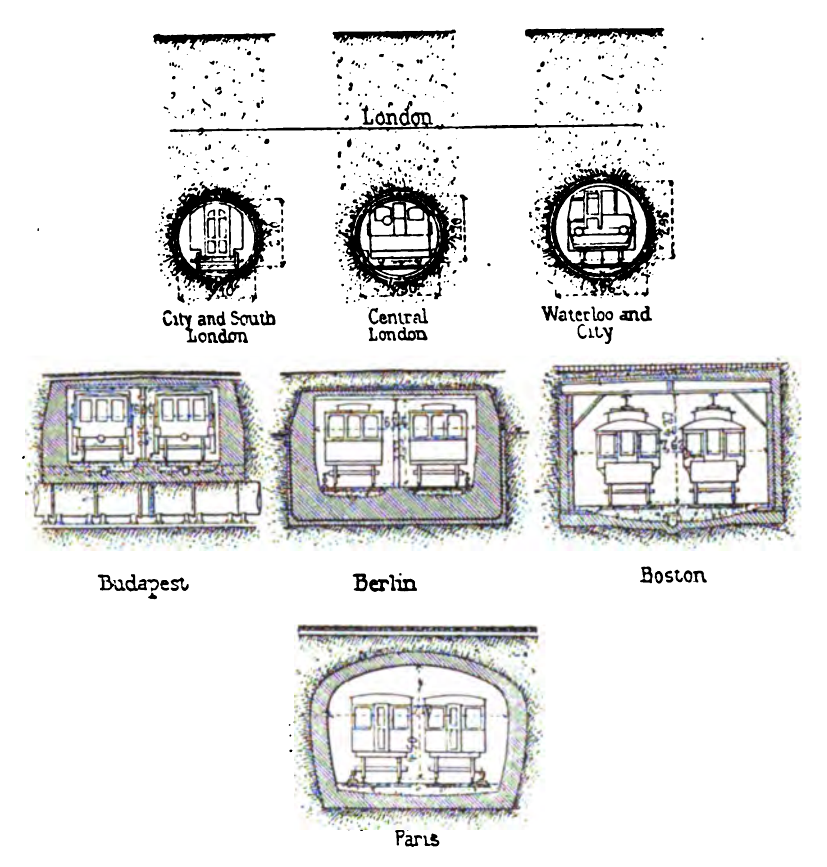


Fig. 329. — Section transversale de divers métropolitains souterrains.

La voiture, à quatre moteurs de 125 chevaux, pèse 37 tonnes,

le Conseil d'administration de la compagnie du chemin de fer de la Méditerranée, a exprimé sa parfaite satisfaction au sujet du fonctionnement de la ligne. Le système du 3e rail a donné les plus heureux résultats : le nombre des voitures est devenu rapidement insuffisant, et la Compagnie a dû proposer au gouvernement italien d'en acquérir de nouvelles.

dont 8,500 t. pour les moteurs. Ces voitures peuvent facilement atteindre une vitesse de 100 kilomètres à l'heure. Grâce à leurs



Fig. 330. — Voiture automotrice du Waterloo and City (Londres).

quatre moteurs elles démarrent également très vite, étant susceptibles de réaliser une accélération de 0,90 m. par seconde.



Fig. 331. — Vue intérieure d'une automotrice du Waterloo and City.

Pour un service de métropolitain des sujétions différentes interviennent.

D'abord on est moins libre, quant au gabarit, en raison des dimensions adoptées pour les sections types des ouvrages sou-

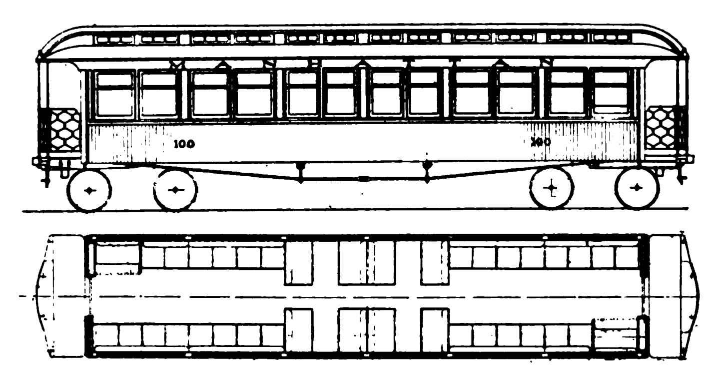


Fig. 332. — Automotrice du Manhattan Railway. Plan et élévation.

terrains (fig. 329). En outre quand, au lieu d'un souterrain en maçonnerie, on a eu recours à un souterrain tubulaire, on s'est



Fig. 333. — Automotrice du Manhattan Railway. Vue d'ensemble.

heurté à une nouvelle difficulté provenant du peu de hauteur disponible.

On a dû, dans ce cas, combiner des châssis à décrochement central, de manière à occuper toute la place disponible entre les

bogies. Les figures 330 et 331 représentent une voiture ainsi établie (Waterloo and City). Des voitures analogues ont été combinées pour le Central-London. Elles ont une longueur de 14 mètres, une largeur de 2,56 m. et une hauteur intérieure de 2.35 m. La hauteur du plancher au-dessus du rail n'est que de 0,33 m. Les bogies ont un empattement de 1,800 m. et leur distance d'axe en axe est de 8,75 m. Pour faciliter l'abaissement du plancher de la voiture, on n'a donné aux roues qu'un diamètre de 0,63 m. Chaque voiture automotrice est munie de quatre moteurs de 125 chevaux, à raison d'un par essieu. Ces moteurs peuvent développer chacun un effort de traction, à la jante des roues, de 1 250 kilogrammes, à la vitesse de 29 kilomètres à l'heure, la consommation étant, alors, de 200 ampères à 500 volts.

Sur les métropolitains constamment en viaduc on a les coudées plus franches et il y aurait, alors, un intérêt évident à n'employer que des wagons d'un type normal. Cependant, pour des considérations de dépenses, on a parfois adopté des voitures moins larges que celles des grandes lignes (2,40 m. à 2,60 m. au lieu de 2,90 m. à 3 mètres. Tel est le cas, notamment, de l'Elevated, de New-York (Manhattan Railway) où les automotrices n'ont qu'une largeur de 2,65 m. (fig. 332 et 333). Ces voitures présentent les dimensions principales ci-après :

Largeur	2,65 m.
Longueur.	14,34 m.
Écartement d'axe en axe des bogies	9,95 m.
Empattement des bogies.	1,80 m.
Hauteur de la voiture de dessus du rail.	3,87 m.
Hauteur du plancher de dessus du rail	1,16 m.

Sur les deux bogies un seul est moteur et comporte deux moteurs de 125 chevaux.

Le poids de la voiture est de 25 tonnes.

La largeur de la caisse ne permet pas l'établissement, d'un bout à l'autre de la voiture. d'un couloir longitudinal. Aussi, sur

la plus grande partie de la longueur, les places se font face, avec la paroi de la voiture comme dossier.

Le métropolitain de Berlin est à la fois souterrain et aérien. Nous avons déjà fait connaître les dispositions principales des voitures automotrices qui y sont en usage. Nous avons vu que la largeur n'était que de 2,26 m. Aussi les sièges sont-ils tous adossés aux parois.

La disposition intérieure des places et le mode d'évacuation des voyageurs, ont, en matière d'exploitation métropolitaine, une importance prépondérante. Comme les arrêts durent à peine une dizaine de secondes il faut que l'embarquement et le débarquement des voyageurs puissent se faire avec une grande rapidité. A ce point de vue le couloir longitudinal uniforme, d'un bout à l'autre de la voiture, prête à la critique. Il vaut mieux lui donner une section croissante, du milieu vers les portes de sortie. Quant à ces portes, elles doivent s'ouvrir largement et une bonne solution consiste à prendre des portes à deux battants, avec mouvement simultané.

Sur quelques lignes on a prévu dans les voitures de larges plate-formes pour les voyageurs debout. On peut ainsi, pendant les heures chargées de la journée, augmenter très notablement la capacité normale des voitures. Mais c'est évidemment au détriment du confort des voyageurs, avec cette atténuation, cependant, que la gêne est de peu de durée, en raison de la faible longueur des trajets.

Il est enfin très désirable d'avoir dans les voitures une porte pour la sortie des voyageurs et une porte pour l'entrée. Mais le public ne consent pas toujours à observer strictement ces deux directions.

Ces diverses questions feront, d'ailleurs, l'objet d'un examen ultérieur, quand nous aurons à traiter de l'exploitation.

Automotrices accouplées. — Quand, dans un train, pour des

raisons de traction ou de vitesse, on doit insérer plusieurs automotrices il faut pouvoir, de la voiture de tête, commander à la fois tous les moteurs. La difficulté, dans ce cas, est d'opérer simultanément les divers groupements qui constituent le couplage série-parallèle et qui comportent souvent une dizaine de combinaisons. Le mieux, alors, est de ne pas agir directement sur les moteurs, mais sur des contrôleurs, appareils connus et ayant fait leurs preuves. En sorte que l'on réalisera un train à plusieurs motrices, en constituant celles-ci par des motrices à contrôleur, mais en disposant un appareil de manœuvre qui agira sur les contrôleurs et remplacera mécaniquement, dans chaque voiture, l'action directe et personnelle du conducteur.

Il est naturellement indiqué d'effectuer cette manœuvre à distance par l'électricité (Sprague, Thomson-Houston). Mais la généralisation du freinage par l'air comprimé, méthode qui suppose naturellement la constitution, sur les trains eux-mêmes, d'une réserve d'air comprimé, c'est-à-dire de force motrice, a conduit à faire également la manœuvre des contrôleurs par l'air comprimé. La grande facilité avec laquelle on effectue tout le long d'un train les différentes manœuvres que comporte le freinage permettait de supposer que l'air comprimé se prêterait parfaitement à l'achèvement des contrôleurs. Les faits ont confirmé ce raisonnement déductif et deux systèmes ont reçu, aujourd'hui, la sanction de la pratique : celui de M. Auvert, ingénieur à la Cie P. L. M. (Ligne du Fayet à Chamonix) et celui de la Cie Westinghouse (Brooklyn Rapid Transit).

Système Sprague. — M. Sprague est le pionnier du *multiple unit system*, c'est-à-dire de la constitution d'unités motrices, toutes identiques, et que l'on peut intercaler dans un train au fur et à mesure des besoins. Avec ce système rien n'est plus facile que de proportionner la capacité d'un train aux exigences passagères du trafic. Il suffit d'ajouter aux trains en circulation le

nombre de voitures que nécessite l'affluence des voyageurs et comme celles-ci apportent avec elles les mêmes éléments de traction que les premières, le régime du train, au point de vue des démarrages et de la vitesse, sera rigoureusement conservé. On peut donc constituer des trains très longs (fig. 334), sans rien perdre de la souplesse et de la facilité de commande qui caractérisent une automotrice électrique.

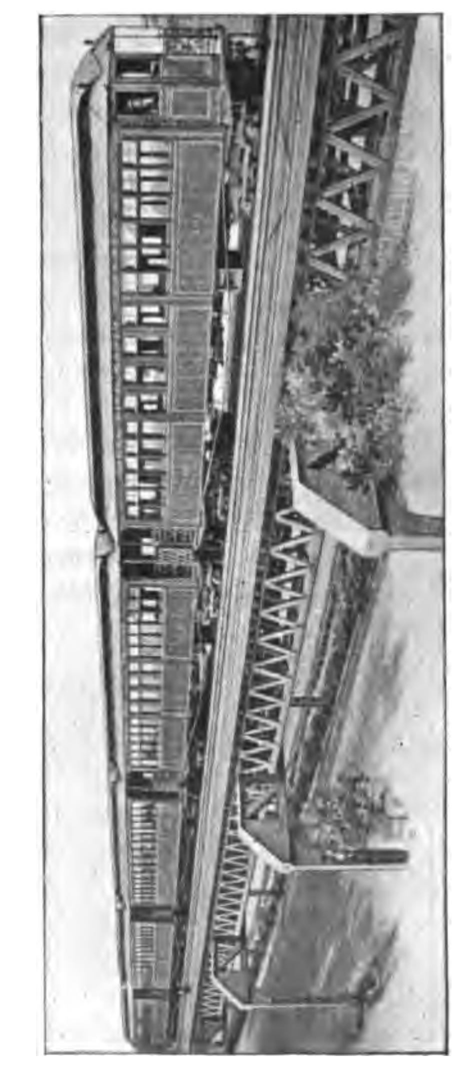


Fig. 334. — Train Sprague.

Une telle combinaison est particulièrement avantageuse sur les métropolitains, attendu que, par suite des besoins normaux de la population, le trafic tend à y former deux grandes vagues journalières : le matin, vers 8 à 9 heures, et le soir, de 5 à 7.

Dans le système Sprague chaque voiture automotrice comporte :

1° *Un contrôleur de plate-forme* servant pour la manœuvre de la voiture ainsi que de toutes celles qui lui seront accouplées (fig. 335). Si la voiture



Fig. 335. — Système Sprague. Contrôleur de plate-forme.

est établie pour un service en navette, elle aura deux plate-formes et par suite deux contrôleurs;

2° *Un inverseur* pour la marche avant ou la marche arrière.

3° *Un contrôleur pour le démarrage et le réglage de la vitesse* (fig. 336). Cet appareil n'est autre qu'un cylindre à touches multiples, permettant d'effectuer tous les groupements du couplage par série-parallèle.

La manœuvre de l'inverseur et du contrôleur de démarrage et de réglage s'effectuent au moyen de 5 fils régnant tout le long du train et dans lesquels le contrôleur de plate-forme de la voiture de tête peut envoyer du courant pris sur le frotteur de cette voiture.

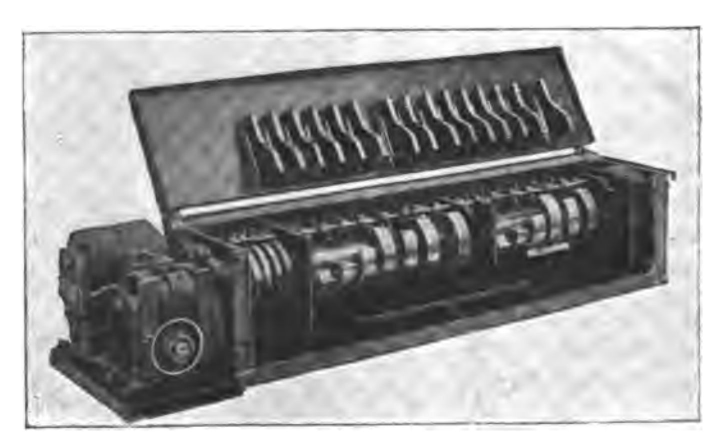


Fig. 336. — Système Sprague. Contrôleur.

Les 5 fils de train n'ayant à mettre en mouvement que des

appareils de manœuvre ne sont qu'à petite section et peuvent par conséquent être facilement logés sous les caisses des voitures. Entre deux voitures consécutives ils sont reliés par un *coupleur* (fig. 337).

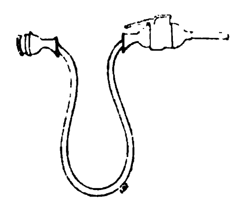


Fig. 337. — Coupleur.

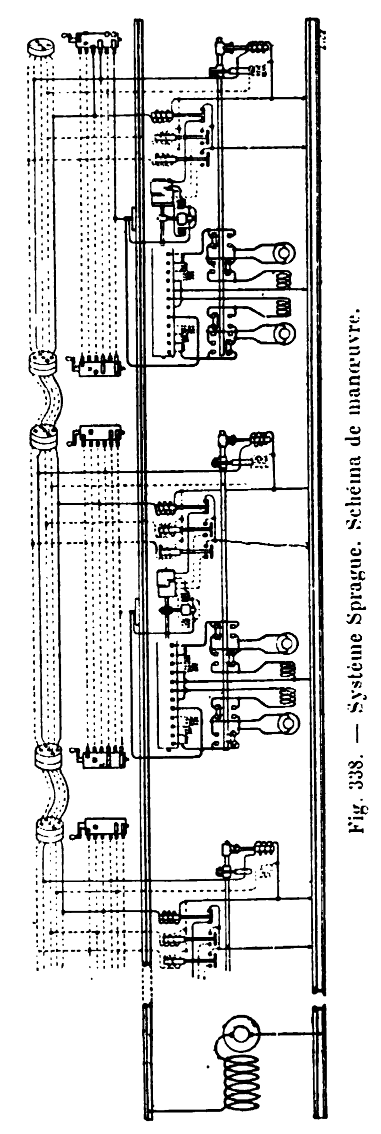


Fig. 338. — Système Sprague. Schéma de manœuvre.

Les câbles d'amenée du courant aux moteurs sont spéciaux aux voitures et n'ont qu'une faible longueur, c'est-à-dire celle strictement nécessaire pour aller du frotteur aux moteurs par le contrôleur de démarrage et de réglage et pour jonctionner les moteurs du châssis de la voiture, afin que le courant puisse passer dans les roues et de là dans les rails de retour.

Quant aux différentes manœuvres, elles s'effectuent comme le montre le schéma de la figure 338. On suppose le train commandé par le contrôleur de plate-forme de droite. Les 6 fils régnant dans chaque voiture, de contrôleur à contrôleur, servent uniquement pour établir les dérivations avec les 5 fils de train, le 6e fil amenant

le courant au contrôleur. Dans toutes les autres voitures, autres que celle de tête, les contrôleurs sont dans une position telle que les dérivations ne fonctionnent pas. Mais rien n'empêcherait de faire effectuer la manœuvre par une voiture quelconque. Par conséquent en éliminant d'un train un nombre quelconque de voitures, celle qui les suivra immédiatement sera toute prête pour effectuer la conduite de la partie restante du train.

Suivons les fils de train le long des voitures. Deux d'entre eux, par un jeu d'électros-aimants, agiront sur l'*inverseur*. C'est un long cylindre qui permet de changer le sens du courant dans les induits des moteurs. Quand cet inverseur est à la position de repos, le courant est coupé dans la voiture. Un des fils de train provoque la marche avant et l'autre la marche arrière. Un ressort antagoniste tend à ramener l'inverseur dans la position de repos. Par conséquent, si une avarie arrive aux fils de train, le courant ne peut plus aller aux moteurs.

Les 3 autres fils de train agissent sur un petit moteur électrique (appelé le servo-moteur), qui fait tourner le contrôleur de démarrage comme il suit : l'un provoque une rotation effectuant la mise en série sur résistances graduellement décroissantes; l'autre, par une seconde impulsion, met les moteurs en parallèle avec et sans résistances ; enfin le 3e fil ramène le contrôleur au zéro.

Il faut éviter que les différentes touches du contrôleur n'échappent aux contacts que mollement et, de même que dans le contrôleur à main, il est indispensable de procéder par saccades. Aussi le servo-moteur ne commande-t-il pas le cylindre du contrôleur directement, mais par l'intermédiaire d'un système à encoches, avec ressorts produisant une série de déclanchements.

Enfin une autre précaution doit être prise. Il faut que, dans les rampes, le couplage par série-parallèle soit fait plus lentement, car, alors, les moteurs développent moins vite leur force contre-électromotrice et, avec un couplage ordinaire, l'intensité du cou-

rant prendrait une valeur exagérée. Aussi un dispositif spécial freine-t-il le servo-moteur, dès que l'intensité débitée dépasse celle qui correspond à un démarrage normal.

Le système Sprague a été appliqué à Boston et à Brooklyn et l'expérience qui en a été faite dans ces deux installations a montré que, malgré sa complication apparente, il convenait parfaitement pour une exploitation métropolitaine. La Cie des Chemins de fer de l'Ouest a mis également à l'essai, sur sa ligne des Invalides à Versailles, un train de ce système. Le contrôleur de démarrage a été placé, comme le montre la figure 339, sous les banquettes des voitures, ce qui a permis de ne modifier en rien le gabarit extérieur.



Fig. 339. — Contrôleur Sprague. Logement sous une banquette (Ligne des Invalides à Versailles).

Système de la General Electric Company. — Dans le système de la General Electric Company le circuit de manœuvre comporte 9 fils. Ces 9 fils, qui règnent d'un bout à l'autre du train et dont la jonction entre voitures est effectuée par le *coupleur*, que représente la figure 340, sont en dérivation à la fois sur les *contrôleurs de plate-forme* (fig. 341 et 342), ce qui permet la manœuvre d'un point quelconque du train et sur les appareils de manœuvre de chaque voiture automotrice, savoir : un *inverseur* (fig. 343)

pour la marche avant et arrière, une série d'*interrupteurs électro-magnétiques* (fig. 344) remplaçant le contrôleur tournant du système Sprague. C'est parce que l'on agit successivement sur ces interrupteurs qu'il faut 9 fils, alors que, dans le système Sprague, 3 fils suffisent pour produire tous les contacts voulus. S'il en résulte une petite complication on voit, en revanche, que le wattman règle les démarrages et les vitesses absolument comme



Fig. 340. — Coupleur.

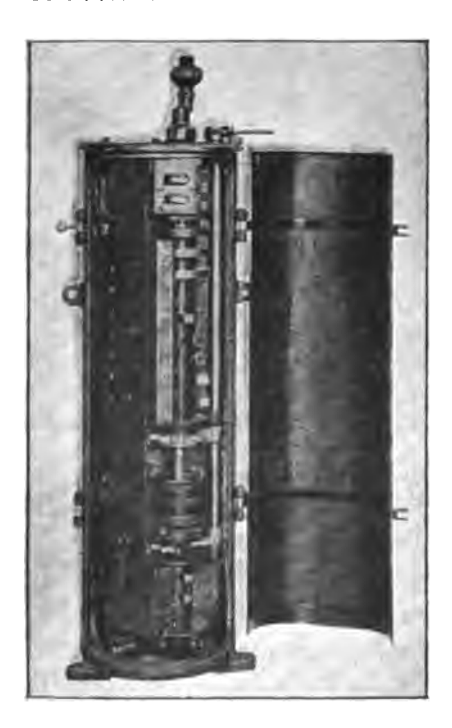


Fig. 341. — Système de la General Electric Company. Contrôleur de plate-forme.



Fig. 342. — Emplacement du contrôleur sur la plate-forme.

avec un contrôleur ordinaire. Il a complètement son train dans

la main et il suffit qu'il soit habitué à la manœuvre du contrô-



Fig. 343. — Inverseur.

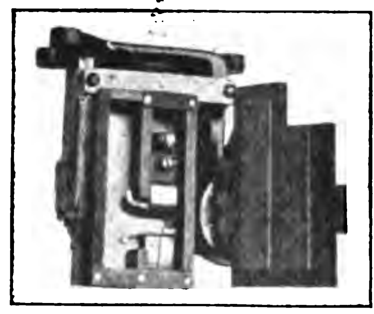


Fig. 344. — Interrupteur.

leur usuel, pour pouvoir conduire un train à unités multiples.

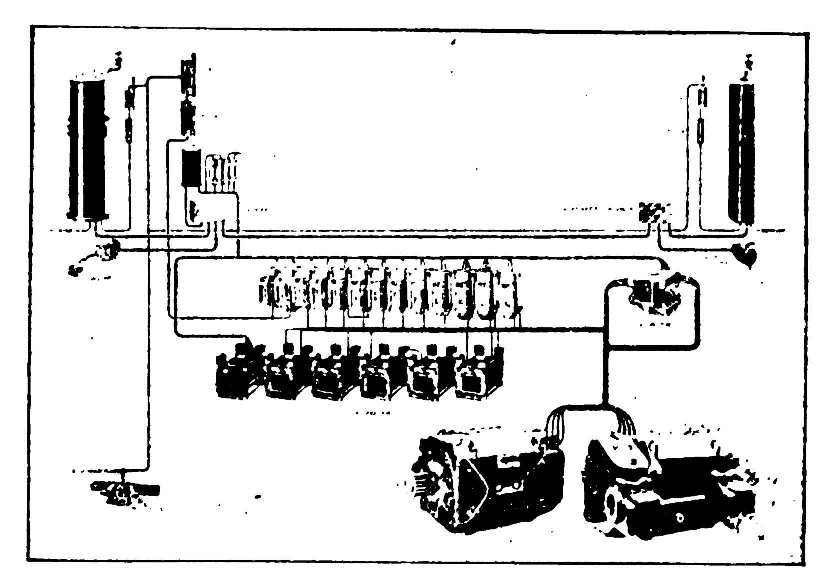


Fig. 345. — Système de la General Electric Company. Ensemble des circuits pour une voiture.

Chaque voiture automotrice a son indépendance au point de vue de la prise de courant (fig. 345). Mais on peut relier toutes

les voitures d'un train par un fil spécial, afin d'assurer la continuité de l'alimentation au passage des croisements et des aiguilles.

Les interrupteurs électro-magnétiques et l'inverseur se montent sur l'un des côtés extérieurs de l'automotrice. Il suffit de rabattre un couvercle pour pouvoir les visiter.

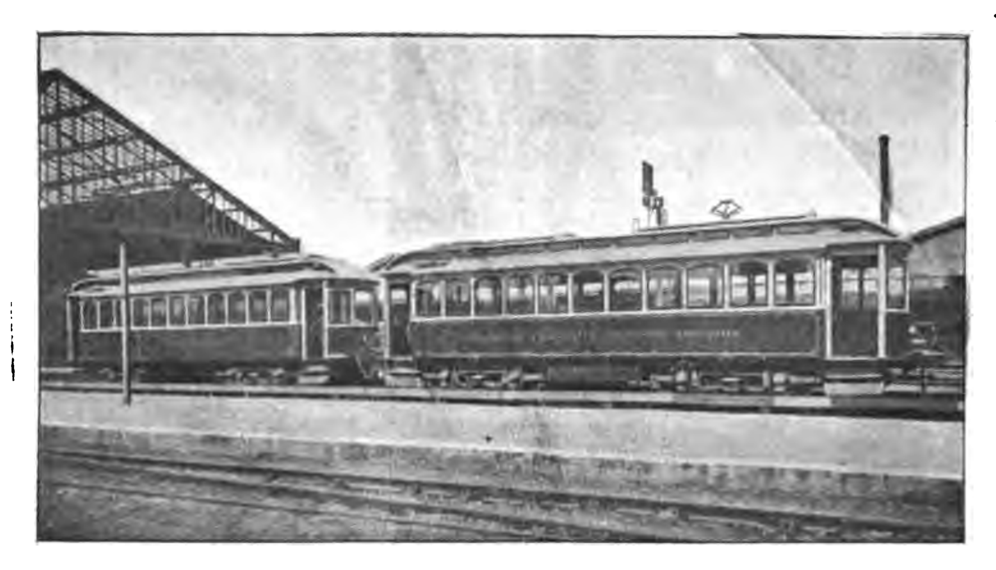


Fig. 346. — Train d'essai de la Cie d'Orléans, système de la General Electric Company.

Le système de la General Electric Company a été appliqué à des trains d'essais de l'Ouest et de l'Orléans (fig. 346) et à divers métropolitains, notamment le Manhattan Railway, de New-York.

Cette dernière installation, particulièrement importante, comporte 850 voitures automotrices à bogies, du type précédemment décrit (page 394). Les trains sont normalement composés de 6 voitures sur lesquelles les voitures 1, 3, 4 et 6 sont motrices.

Toutes les voitures automotrices sont munies de deux plates-formes de manœuvre. Mais, comme la plate-forme d'avant de l'automotrice de tête est seule utilisée pour la conduite du train, on rend, dans toutes les autres voitures, les plates-formes accessi-

bles aux voyageurs, en isolant, par des cloisons à rabattement, le contrôleur de manœuvre et les appareils accessoires.

Sur le métropolitain de Paris une partie des nouveaux équipements a été combinée par la Cie Thomson Houston, selon le système de la General Electric Company, mais avec des simplifications notables, rendues possibles, par suite des conditions à remplir. Le train normal est, en effet, constitué par 4 voitures dont une seule motrice et le programme posé aux constructeurs visait seulement la possibilité de faire marcher, aux heures de grande affluence, deux trains normaux, accouplés entre eux.

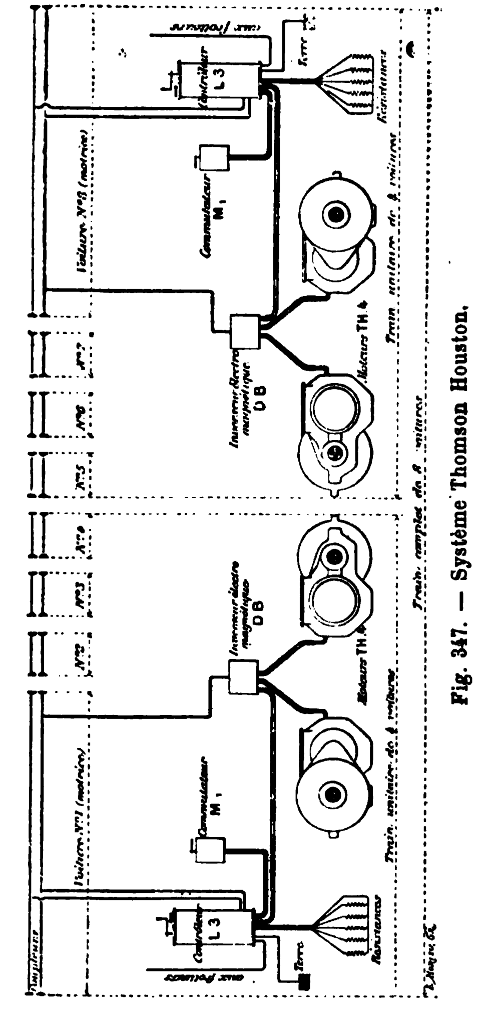


Fig. 347. — Système Thomson Houston.

Les voitures motrices n'étant munies que de 2 moteurs, le train accouplé ne comporte que 4 moteurs. Or, la manœuvre de 4 moteurs ne nécessite qu'un contrôleur ordinaire, si l'on prend soin, comme nous l'avons dit précédemment, de grouper les moteurs par deux. Par conséquent, avec le contrôleur et les résistances de tête on pourra, en réunissant les moteurs par un câble régnant le long du train, procéder très aisément au couplage

série-parallèle des deux groupes de moteurs. Mais la marche arrière ne peut être ainsi obtenue, en raison de l'excitation série des moteurs. On la réalisera par l'*inverseur* du *multiple unit*. C'est surtout par cet appareil que le système appliqué sur le métropolitain de Paris se rattache au système général précédemment décrit. A la vérité on pourrait, comme sur le métropolitain de Berlin, s'en dispenser en faisant marche arrière, seulement avec les moteurs de la 1re voiture. Mais on risquerait de ne pas avoir ainsi une adhérence suffisante, sans compter qu'il faudrait se priver du moyen de freinage très énergique que procure le renversement du courant en cas de danger. Avec l'inverseur, le wattman agit aussi bien sur la 1re voiture motrice que sur celle de la seconde partie du train. Quant à la manœuvre de l'inverseur elle s'effectue à l'aide de deux fils, l'un servant pour la marche avant et l'autre pour la marche arrière.

L'accouplement des trains de 4 voitures peut se faire soit par l'arrière, comme le montre la figure 347, soit bout à bout, soit en plaçant les deux voitures motrices en tête du train. La première disposition était d'abord appliquée. Elle a l'inconvénient de comporter l'établissement, le long du train, d'un câble à 5 ou 600 volts et à gros débit. Aussi la Compagnie préfère-t-elle maintenant la dernière disposition, qui offre une sécurité plus grande.

Système Westinghouse. — Dans le système à unités multiples Westinghouse, les voitures automotrices sont munies d'un contrôleur ordinaire[1]; mais ce contrôleur est surmonté d'un appareillage à air comprimé, effectuant mécaniquement tous les mouvements que le wattman fait, à la main, dans une voiture ordinaire.

Ces mouvements correspondent aux phases ci-après :

1° Marche avant de l'inverseur;

2° Marche arrière de l'inverseur;

[1] Dans un nouveau modèle, à l'essai, le contrôleur ordinaire est supprimé et remplacé par un disque de manœuvre, placé sous la voiture.

3° Marche touche par touche du contrôleur;
4° Retour au zéro;
5° Interruption du courant.

Chaque mouvement est produit par un piston à air comprimé

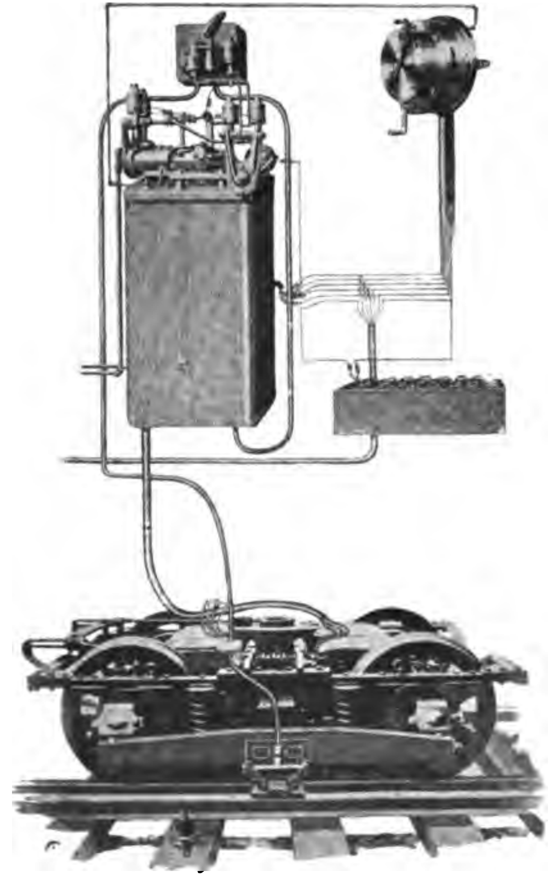


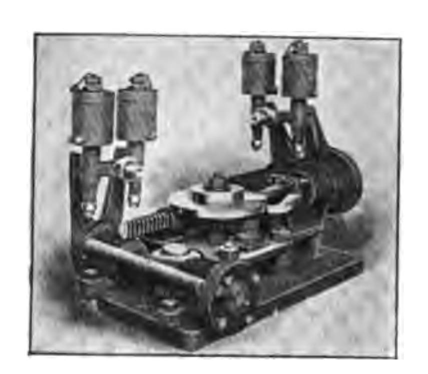
Fig. 348. — Système Westinghouse. Commande d'un équipement.

que commande une valve à électro-aimant. Il y a 5 valves et par suite 5 fils de commande, plus un fil de retour.

Le courant qui met les valves en mouvement provient d'une

petite batterie d'accumulateurs. Il est de 0,05 ampère à la tension de 7 volts. Quant à l'air comprimé il est pris au réservoir principal servant pour le freinage.

La figure 348 indique comment se fait la commande générale d'un équipement. L'appareil de manœuvre, figuré à droite, comporte, en haut, une petite manette que l'on tourne à droite ou à gauche pour produire l'inversion; sur le côté, une petite tige cor-



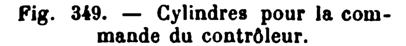

Fig. 349. — Cylindres pour la commande du contrôleur.


Fig. 350. — Interrupteur automatique.

respondant à l'interrupteur et, à la partie inférieure, une manette dont les mouvements sont reproduits sur un cadran central et dont les déplacements successifs provoquent dans les contrôleurs des différentes voitures la rotation du cylindre de couplage.

Au-dessus des appareils de manœuvre du contrôleur (fig. 349) se trouve un interrupteur du type usuel, que l'on peut manœuvrer, par l'air comprimé, à l'aide des cylindres que montre la figure 350 et qui est disposé pour couper le courant automatiquement, dès que l'intensité dépasse une valeur donnée.

La figure 351 montre 2 voitures équipées selon le système Westinghouse. Tout se réduit, en somme, comme organes com-

[1] *Revue générale des chemins de fer* (avril 1902). — *Génie civil*, 5 juillet 1902.

muns, à 6 fils de petit diamètre, reliant toutes les voitures entre elles et en dérivation, dans chaque voiture, sur le cadran de manœuvre.

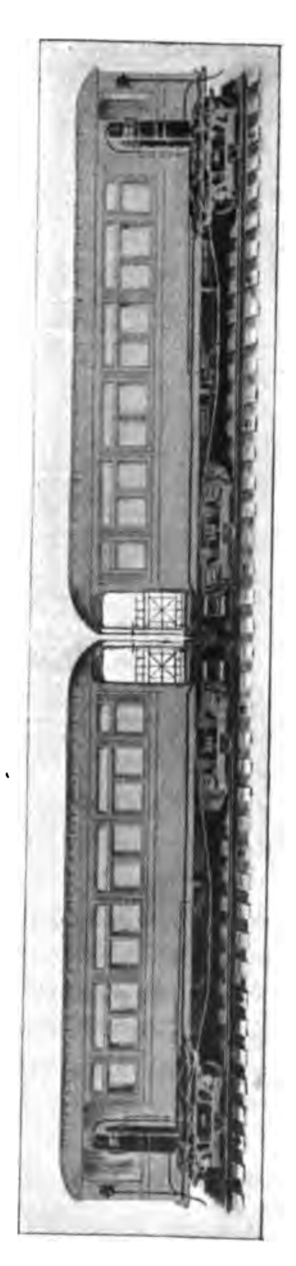


Fig. 351. — Train Westinghouse.

Système Auvert. — Dans le système Auvert toutes les commandes se font par l'air comprimé. Pour les simplifier on n'effectue pas le couplage des moteurs par série-parallèle. Ceux-ci, au nombre de deux par automotrice, restent couplés en parallèle et le contrôleur a pour objet simplement d'intercaler des résistances sur leur circuit commun d'alimentation, puis de shunter les inducteurs. De plus, il n'y a pas de cylindre inverseur. C'est le cylindre du contrôleur qui, après avoir été ramené au zéro, change le sens du courant dans les induits; et, en continuant à tourner, il passe sur des touches identiques à celles de la marche avant.

Ainsi donc le contrôleur est symétrique par rapport à la touche *o* qui correspond à l'interrupteur de courant. A droite sont les cinq touches de la marche avant (trois sur résistances, une sans résistance, la cinquième avec inducteurs shuntés) et à gauche cinq touches semblables, pour la marche arrière.

Chaque contrôleur peut être manœu-

vré à la main quand la voiture circule isolément. Quand, au contraire, les automotrices sont accouplées, leurs contrôleurs sont mis en mouvement par un *servo-moteur* dont le fonctionnement est représenté schématiquement par la figure 352. L'attaque du contrôleur est faite par une crémaillère, que met en mouvement un piston communiquant par chacune de ses faces avec deux conduites d'air comprimé ; l'une dite *conduite avant*, l'autre *conduite arrière*.

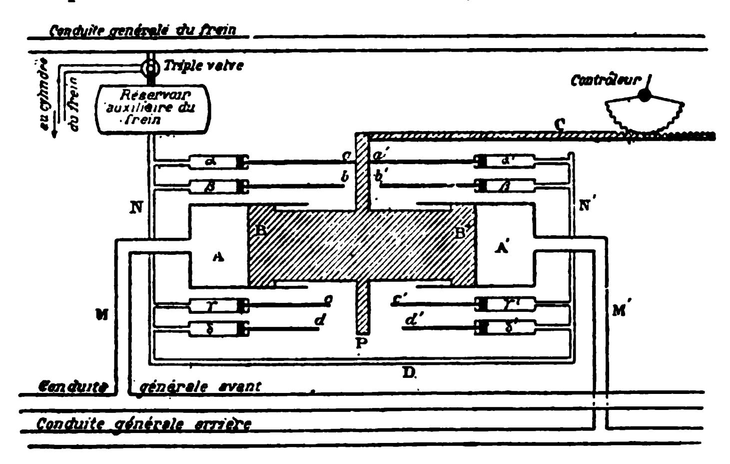


Fig. 352. — Système Auvert (mode général de fonctionnement).

Supposons que la conduite avant soit seule alimentée par de l'air comprimé, le piston se déplacera vers la droite, ayant tendance à faire parcourir au contrôleur les cinq touches de démarrage et de shuntage. Pour que ce mouvement s'opère progressivement et par saccades le piston est arrêté cinq fois dans sa marche par des taquets à pistons, dont les tiges ont des longueurs variables et sur lesquelles s'exerce la pression du réservoir auxiliaire des freins à air comprimé[1]. En augmentant cinq fois la pression de l'air dans la conduite avant on produira en cinq fois l'enfoncement, d'abord du premier taquet, puis du premier et du second, etc. Et à chaque enfoncement correspondra une rotation partielle du contrôleur.

[1] Sur la figure schématique 451 on n'a fait figurer, pour simplifier, que 4 pistons.

Par une dépression dans la conduite on obtiendra le retour au zéro. Enfin, pour la marche arrière, il suffira d'opérer avec la conduite arrière, comme on l'a fait avec la conduite avant,

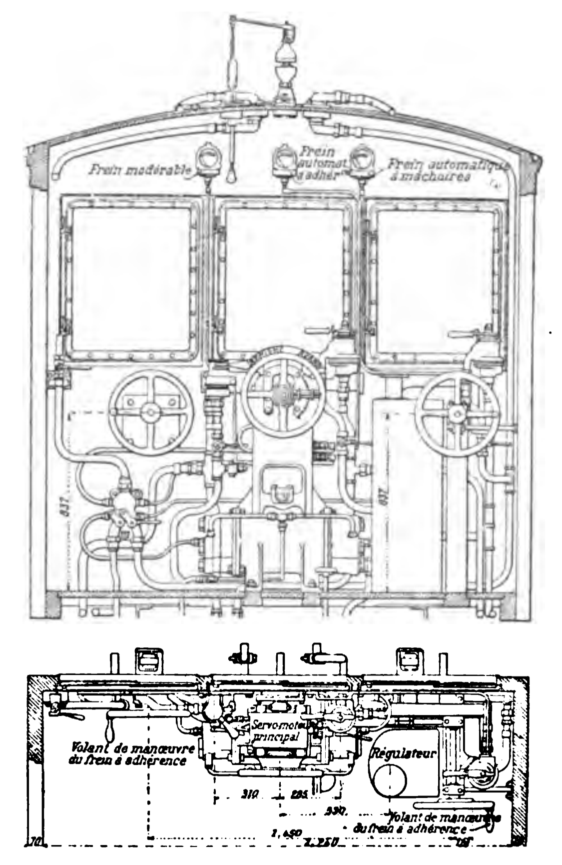


Fig. 353. — Système Auvert (cabine de manœuvre).

Les variations successives de pression qu'il faut réaliser dans les conduites avant ou arrière sont produites par un *servo-moteur principal,* placé sur la voiture de tête et dont la manœuvre ne nécessite que la rotation d'un volant.

Le système Auvert a été appliqué aux voitures de la ligne à voie

de 1 mètre du Fayet à Chamonix (fig. 353). Cette ligne, dont le profil est très accidenté (les rampes y atteignent 90 millimètres) ne pouvait être exploitée par automotrices isolées. Les trains se composent de 5 à 6 voitures automotrices à deux essieux. A l'avant se trouve un fourgon automoteur avec plate-forme pour le wattman et son servo-moteur principal. Les voitures remorquées n'ont pas de servo-moteur principal. Le servo-moteur du contrôleur se trouve sous le châssis; quant au contrôleur il est logé dans une caisse en tôle sur l'une des plates-formes. Les moteurs ont une puissance de 65 chevaux chaque.

Le poids d'un fourgon automoteur est de 21 tonnes. Les wagons pèsent de 19 à 20 tonnes.

L'expérience a montré que non seulement la commande pneumatique des moteurs se faisait avec une grande sûreté, mais que l'accouplement des automotrices procurait une adhérence et un effort de traction supérieurs aux prévisions. En sorte qu'il a été possible à la Cie P.-L.-M. d'ajouter de nouvelles voitures d'attelage aux trains automoteurs.

Automotrices pour courants alternatifs. — Nous avons cité, comme automotrices à courants monophasés, celles de la ligne d'Annapolis. Mais comme ce système n'a pas encore franchi la période des essais nous nous bornerons à examiner les quelques types ayant fait aujourd'hui complètement leurs preuves. Nous voulons parler des automotrices à courants triphasés, soit à basse tension (ligne de Thoune à Burgdorf, ligne de Stanstad à Engelberg), soit à haute tension (ligne de la Valteline).

Les automotrices à courants triphasés présentent plutôt moins de complications que les automotrices avec moteurs à courants continus, en raison de la plus grande simplicité des groupements. Mais comme, à puissance égale, les moteurs à courants triphasés sont généralement plus volumineux que les moteurs à courant continu, on éprouve plus de difficulté à loger les moteurs sous les

caisses des voitures. Ou bien, comme à la Valteline, on doit se résigner à surélever le plancher de la voiture, ce qui rend l'accès de celle-ci un peu moins facile.

On n'a pas encore appliqué le *multiple unit system* aux automotrices à courants triphasés. Mais il n'y aurait pas d'impossibilité à le faire.

Enfin l'expérience de la Valteline a mis complètement en lumière l'adaptation possible des hautes tensions à la traction directe de voitures pour voyageurs. On pouvait, *a priori*, concevoir quelques craintes à ce sujet. Mais les dispositions ingénieuses combinées par MM. Ganz et Cie ont mis non seulement le public à l'abri de tout danger, mais aussi les agents chargés de la manœuvre des voitures.

Automotrices à courants triphasés à basse tension. — Les voitures automotrices de la ligne de Thoune à Burgdorf (750 volts,



Fig. 354. — Chemin de fer de Thoune à Burgdorf. Voiture automotrice (vue d'ensemble).

40 périodes) sont à bogies et à 4 essieux moteurs (fig. 354). La longueur entre tampons est de 16,3 m., la largeur intérieure de 3 mètres. Les bogies (fig. 355), sont écartés d'axe en axe de 9,5 m.

et leur empattement est de 2,2 m. La voie a la largeur normale.

Chaque essieu est attaqué par l'intermédiaire d'engrenages à



Fig. 355. — Bogie des automotrices du chemin de fer de Thoune à Burgdorf.

simple réduction (rapport 3 à 1) par un moteur de 60 chevaux

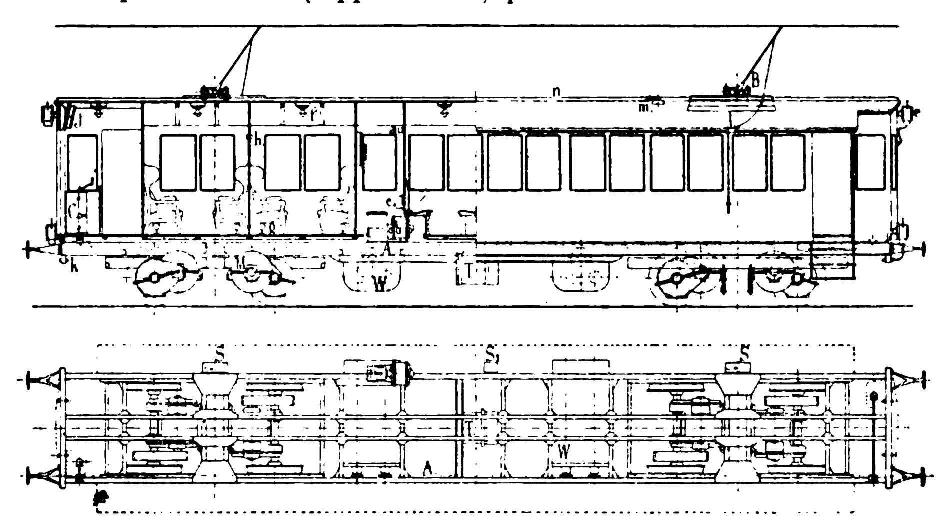


Fig. 356. — Chemin de fer de Thoune à Burgdorf. Automotrice (plan et élévation).

tournant à 600 tours par minute et permettant à la voiture de réaliser une vitesse de 36 kilomètres à l'heure.

L'automotrice est disposée avec un couloir longitudinal et double

plate-forme de manœuvre (fig. 356). Elle contient 16 places de 2e classe et 50 places de 3e classe. Le poids, sans la charge, est de 32 tonnes, dont 10 tonnes pour l'équipement électrique. Chaque moteur pèse 1 500 kilogrammes.

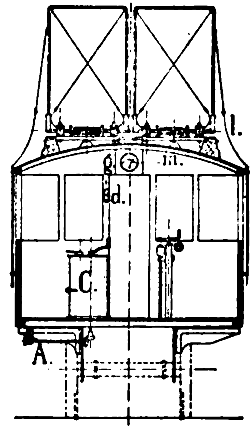


Fig. 357. — Double trolley.

La prise de courant est faite par deux trolleys doubles situés à l'avant et à l'arrière de la voiture (fig. 357). Le démarrage et le réglage de la vitesse s'effectuent par l'insertion de résistances (fig. 358) sur les rotors des moteurs. Cette insertion des résistances s'obtient, d'ailleurs, à l'aide de balais que l'on voit sur le côté gauche de la figure 358 et que met en mouvement le contrôleur, comme il a été dit page 338. Un transformateur de 18 kilowatts, installé sous la caisse de la voiture, permet d'abaisser la tension, pour une partie du courant, de 750 volts à 100 volts. Le courant à 100 volts sert pour l'éclairage,

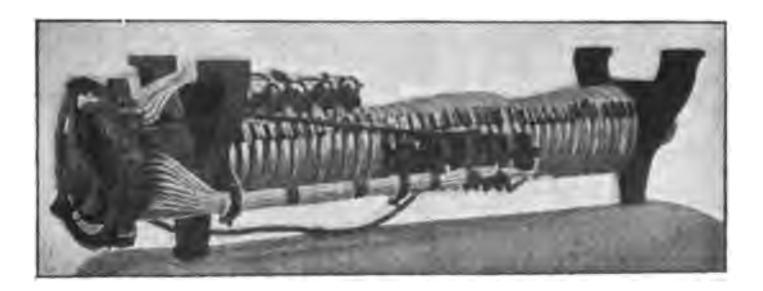


Fig. 358. — Résistances de démarrages.

le chauffage et le compresseur d'air. Ce dernier est actionné par un moteur de 4 chevaux.

L'installation d'Engelberg, antérieure d'une année à celle de Thoune à Burgdorf, est due également à MM. Brown-Boveri. La ligne de Stanstad à Engelberg est caractérisée par ce fait, qu'une

partie est à crémaillère. De part et d'autre de la section à crémaillère se trouvent deux sections ayant respectivement 19,128 k.



Fig. 359. — Automotrice du chemin de fer d'Engelberg.

et 3 372 km. de longueur et qui sont exploitées par simple adhérence, à l'aide d'automotrices (fig. 359). Quand une automotrice

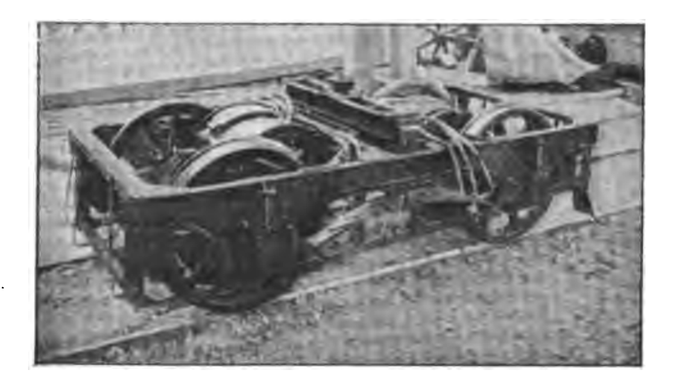


Fig. 360. — Bogie moteur du chemin de fer d'Engelberg.

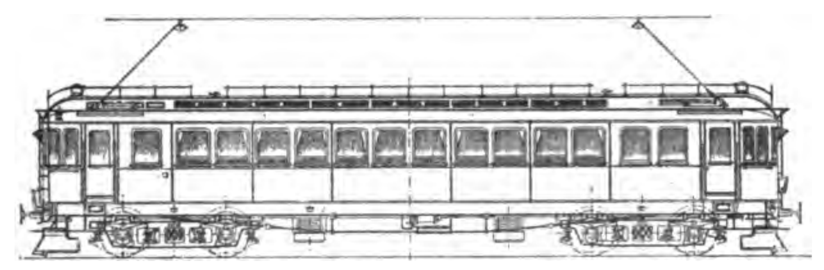
arrive au pied de la crémaillère, elle est poussée en avant par une locomotive à crémaillère, que nous décrivons dans le chapitre concernant les *chemins de fer divers* (page 512), et amenée

ainsi jusqu'au sommet. A partir de ce point elle se rend jusqu'à l'extrémité de la ligne par ses propres moyens.

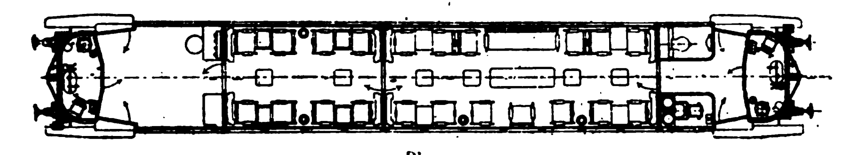
La voie est à l'écartement de 1 mètre et la distribution à lieu à 750 volts. Les voitures sont montées sur bogies. Elles ont 14 mètres de longueur et contiennent un compartiment à bagages, un compartiment pour la 2e classe et un autre pour la 3e classe.

Sur les deux bogies un seul est moteur (fig. 360). Il comporte deux moteurs de 35 chevaux et 480 tours, avec transmission du mouvement par simple réduction au moyen d'engrenages. Le démarrage et le réglage de la vitesse s'obtiennent par insertion de résistances sur les circuits des induits. Un petit transformateur abaisse, sur la voiture, la tension à 100 volts, pour le chauffage et l'éclairage.

Élévation.



Coupe transversale.



Plan.

Fig. 361. — Automotrice du chemin de fer de la Valteline.

Automotrices à courants triphasés à haute tension. — Les automotrices à courants triphasés, 3 000 volts et 15 périodes de la ligne de la Valteline sont de superbes voi-

tures à bogies, spécialement aménagées pour un service d'été.

Indépendamment des deux plates-formes pour wattman, elles renferment un compartiment pour les bagages, deux grands compartiments pour les voyageurs (1re et 2e classe) et un dernier compartiment sur lequel donnent accès un water-closet et une cabine renfermant le compresseur d'air (fig. 361).

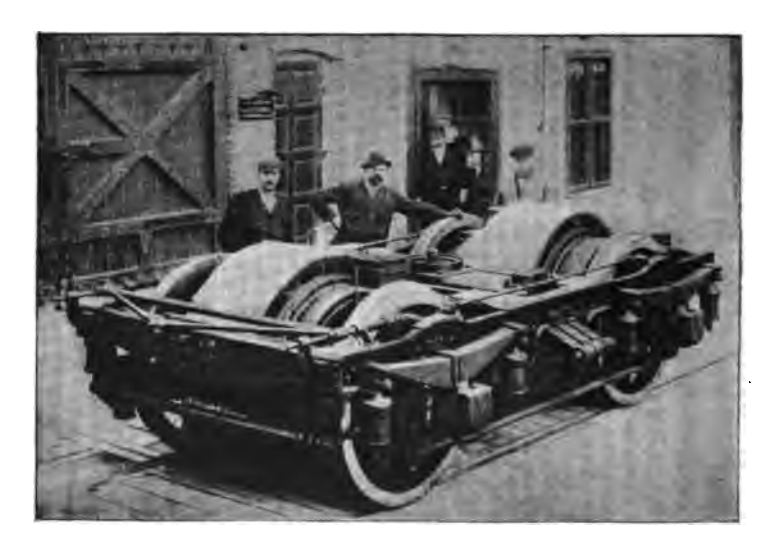


Fig. 362. — Chemin de fer de la Valteline (bogie moteur).

La longueur de la voiture est de 18,10 m. sa largeur de 2,80 m. L'écartement des bogies atteint 11,500 m. et leur empattement 2,500 m. La voiture peut contenir 66 voyageurs. Son poids est de 50 tonnes.

L'équipement est constitué par 4 moteurs de 150 chevaux, permettant le groupement en cascade (page 335). Ces moteurs sont montés directement sur les essieux et attaquent les roues par un accouplement à bielles (fig. 362 et 363).

Comme nous l'avons déjà expliqué (page 216) le courant est pris sur la ligne aérienne à 3 000 volts par un double trolley que

l'on peut rabattre ou élever à l'aide d'un petit mécanisme marchant à l'air comprimé. Le courant va de là dans le stator de

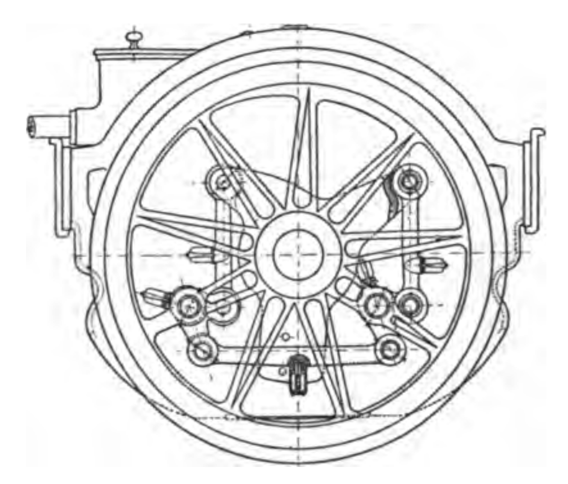


Fig. 363. — Mode d'entrainement des roues.

chaque moteur à haute tension des bogies. Quand aux moteurs à

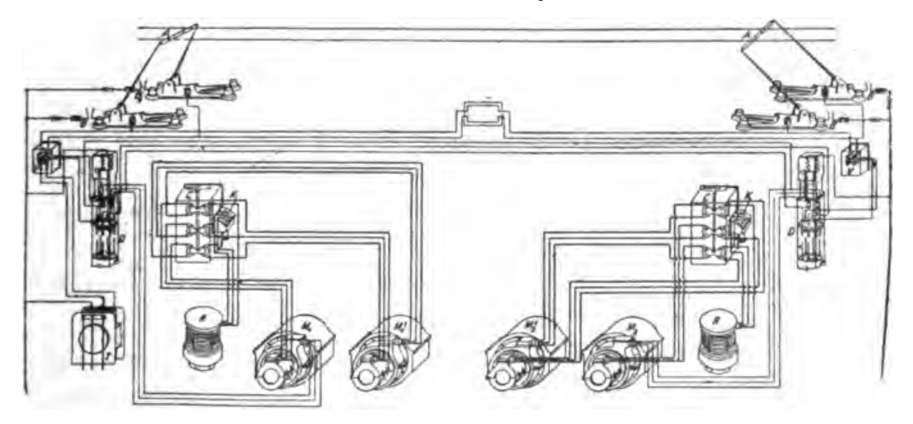


Fig. 364. — Schéma des circuits.

basse tension ils sont alimentés, dans chaque bogie, par le courant produit dans le rotor du moteur à haute tension. Enfin, sur le rotor

des moteurs à basse tension, on peut intercaler un rhéostat liquide de démarrage. Ce même rhéostat peut être également inséré sur le rotor des moteurs à haute tension, quand le couplage en cascade est supprimé.

La figure 364 donne le schéma d'ensemble des circuits de la voiture[1].

De grandes précautions ont été prises pour assurer la sécurité des voyageurs et des agents chargés de la manœuvre des voitures. Les fils à haute tension sont supérieurement isolés et logés dans des tuyaux en fer qui, en cas de court-circuit local, formeraient une terre très franche.



Fig. 365. — Interrupteur primaire.

En somme le conducteur n'a à manipuler comme appareil à haute tension que l'*interrupteur primaire* (fig. 365) placé dans l'un des angles de la cabine du wattman (fig. 366). L'appareil est complètement enfermé dans une caisse en fonte et une fois qu'il a été tourné le wattman n'a plus à y toucher pour le démarrage, les manœuvres se faisant seulement en agissant sur le circuit du rotor, c'est-à-dire sur un circuit ayant une tension maxima de 300 volts.

Le contrôleur est très simple, n'ayant que trois positions : repos, petite vitesse (moteurs en cascade), grande vitesse (moteurs à basse tension hors circuit). L'insertion des résistances se fait (voir page 338) par l'air comprimé, qui peut aussi actionner l'interrupteur primaire.

Dans les pentes et sans que le mécanicien ait à faire la moindre

[1] Société Internationale des Électriciens. Tome III, n° 23, Communication de M. Korda.

manœuvre les moteurs deviennent générateurs et forment frein, en récupérant de l'énergie.

Un transformateur, placé sous la voiture, abaisse la tension pour une partie du courant de 3 000 volts à 100 volts et assure l'alimentation du compresseur d'air des appareils d'éclairage et des appareils de chauffage. Comme le courant n'est qu'à 16 périodes, des lampes à incandescence à simple filament auraient donné une lumière instable. Aussi a-t-on adopté des lampes à 3 filaments, avec globes opaques.

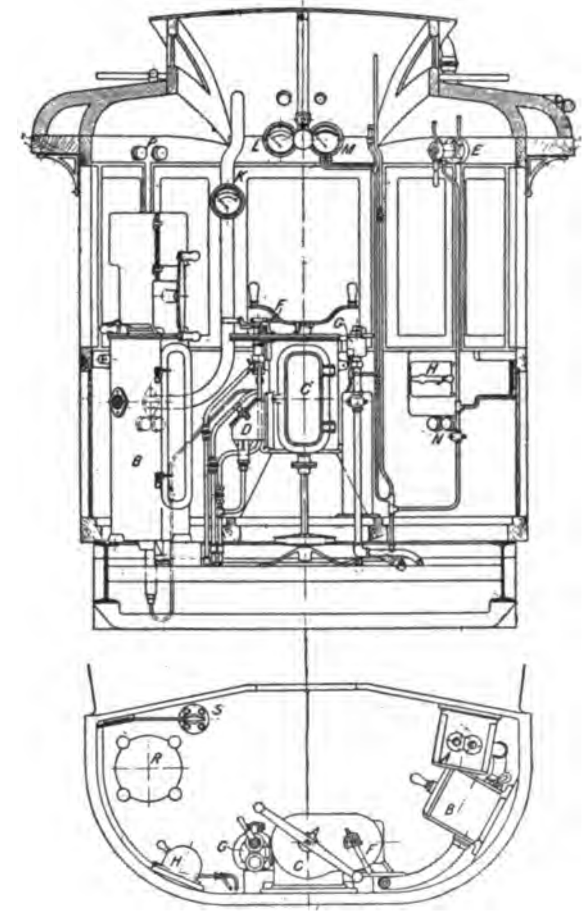


Fig. 366. — Cabine du wattman (plan et élévation).

L'air comprimé ne sert pas seulement pour le freinage et l'insertion des résistances. Il donne également le moyen de relever ou de rabattre avec la plus grande facilité les doubles trolleys de prise de courant. Ce double mouvement est simplement obtenu à l'aide d'un piston à air com-

primé, que l'on commande par un robinet situé dans la cabine du wattman.

A la mise en route on obtient l'air comprimé nécessaire au relèvement du trolley, à l'aide d'une petite pompe à main.

La voiture est munie de deux trolleys doubles, communiquant entre eux par le câblage. Aussi, quand on rabat l'un des trolleys, il faut, l'autre restant encore en contact avec la ligne aérienne, recevoir le trolley rabattu sur un support isolant.

Grâce à la facilité avec laquelle ces trolleys sont manœuvrables on dispose d'un moyen tout à fait pratique pour couper le courant et ces appareils sont, en somme, de véritables interrupteurs.

Automotrices à grande vitesse. — Nous avons dit que les automotrices du chemin de fer de Milan à Varèse permettaient de

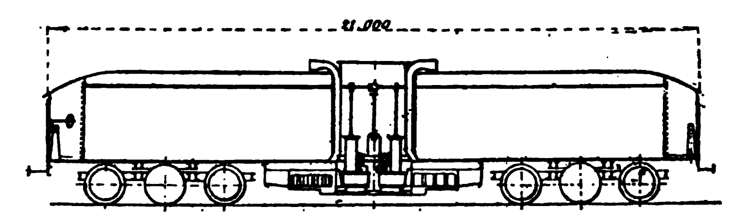


Fig. 367. — Voiture de l'Allgemeine. Disposition générale.

réaliser des vitesses de 100 kilomètres à l'heure. Afin de démontrer qu'avec la traction électrique on pouvait aborder des vitesses beaucoup plus considérables (jusqu'à 200 kilomètres à l'heure) deux très importantes maisons de construction allemandes, l'*Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft* et la *maison Siemens et Halske* ont entrepris, sous les auspices du gouvernement allemand, toute une série d'essais des plus intéressants, sur le chemin de fer militaire de Berlin à Zossen.

Le courant est distribué par une ligne aérienne à trois conducteurs, sous forme de courant triphasé à 10 000 volts. Il est réduit par des transformateurs statiques placés dans les voitures à des

tensions de 435 volts pour les voitures de *l'Allgemeine* et de 1 150 à 1 850 volts pour celles de *Siemens et Halske*.

Les figures 367 et 368 montrent les dispositions générales des



Fig. 368. — Voiture de l'Allgemeine (vue d'ensemble).

voitures de l'Allgemeine. Ces voitures ont 21 mètres de longueur 2, 80 m. de largeur et sont montées sur bogies à trois essieux. L'écartement des bogies, d'axe en axe, est de 13,80 m. celui des essieux de 1,800 m. Sur les trois essieux d'un bogie deux seulement sont moteurs (fig. 369). Ils sont actionnés directement par un moteur de 250 chevaux, dont l'induit est monté sur un man-

chon concentrique à l'essieu (fig. 370) et attaque les roues par des bras à ressorts fixés sur le manchon et venant appuyer sur des saillies ménagées à la périphérie des roues (fig. 371). L'in-



Fig. 369. — Bogie.

ducteur est supporté par des ressorts prenant appui sur les boîtes à huile (fig. 372).

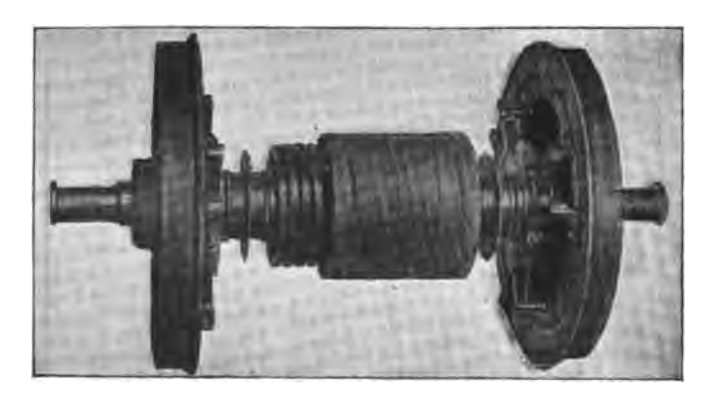


Fig. 370. — Essieu moteur.

La prise du courant est effectuée par trois archets à frotteur vertical. Le courant à haute tension arrive dans un compartiment central, passe de là dans des transformateurs statiques placés sous la caisse de la voiture et qui sont refroidis, pendant la marche, par une prise d'air effectuée au sommet de la voiture, et

revient, à 435 volts, dans le compartiment où se trouvent les rhéostats.

Le démarrage et le réglage de la vitesse se font simplement par intercalation des rhéostats sur chaque rotor des moteurs. Pour diminuer le nombre des connexions ces rotors ont été bobinés en diphasés.

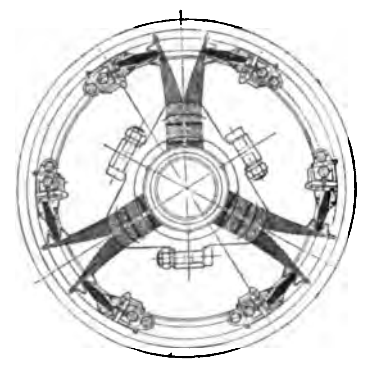


Fig. 371. — Mode d'entraînement des roues.

La mise en circuit des rhéostats se fait d'une façon très ingénieuse. Ceux-ci sont à liquide et ils sont remplis plus ou moins par une petite pompe que met en mouvement un moteur d'un quart de cheval. Ce moteur établit une circulation constante de liquide entre un réservoir principal et le récipient des rhéostats. Mais, au repos, ce liquide revient au réservoir par

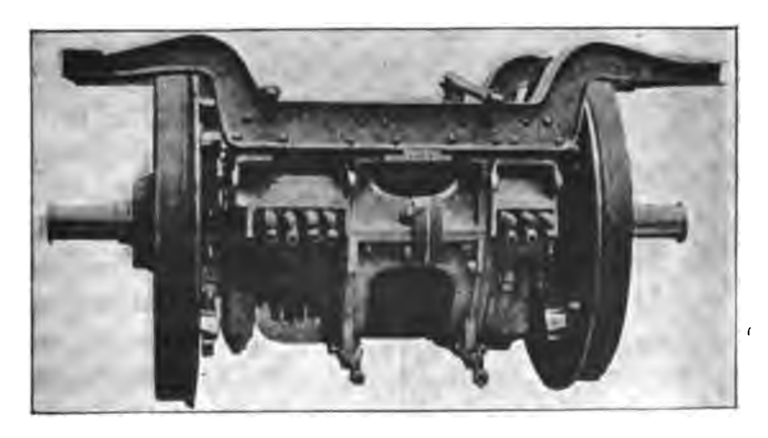


Fig. 372. — Suspension des inducteurs.

une soupape et ne peut atteindre les plaques de tôle reliées aux rotors. Pour la mise en route il suffit de fermer la soupape. Le

liquide monte peu à peu, créant sur les rotors une résistance décroissante. En ouvrant la soupape on peut augmenter la résistance et, par suite, diminuer la vitesse.

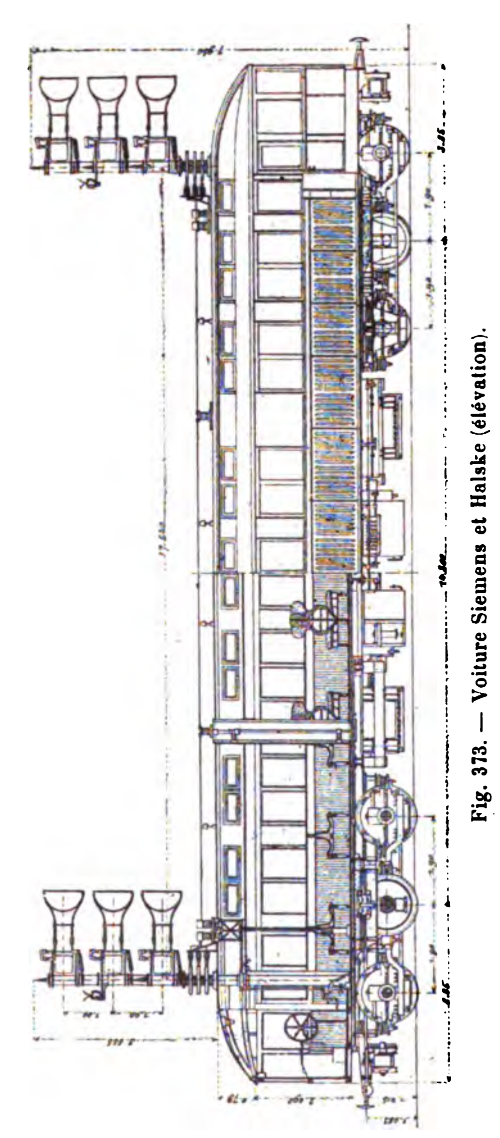


Fig. 373. — Voiture Siemens et Halske (élévation).

La commande de la soupape se fait de la plate-forme du wattman, c'est-à-dire de l'avant de la voiture.

Le rhéostat liquide peut également servir pour le freinage de la façon suivante : on coupe le circuit du stator et on envoie dans cet appareil du courant continu emprunté à une batterie d'accumulateurs que porte la voiture. Le rotor agit, dès lors, comme producteur de courant diphasé et en le reliant au rhéostat on crée une force retardatrice très intense.

La voiture automotrice de l'Allgemeine pèse 90 tonnes dont 29,850 t. pour l'équipement électrique. Elle peut contenir 56 voyageurs.

Aux essais on a réalisé facilement une vitesse de 160 kilo-

mètres à l'heure. Mais, à partir de 130 kilomètres, des mouvements de lacets dus au peu de stabilité de la voie se sont produits. On a, par suite, décidé d'employer des rails plus résistants et il n'est pas douteux qu'avec une voie très solide on ne puisse marcher très aisément à 200 kilomètres à l'heure [1].



Fig. 374. — Voiture Siemens et Halske (vue d'ensemble).

La voiture *Siemens et Halske* (fig. 373 et 374) prend aussi son courant sur la ligne aérienne à 10 000 volts (fig. 375) par un triple archet. Pour contrebalancer la pression qu'exercent les ressorts de rappel sur les fils de ligne on a muni chaque archet d'un écran compensateur, sur lequel s'exerce la pression de l'air (fig. 376).

[1] Quand la voiture marchait à 100 kilomètres à l'heure elle pouvait encore parcourir, après rupture totale du courant, une distance de 9 000 mètres. On en a déduit une résistance moyenne de 3,3 kg. par tonne. A la vitesse de 155 kilomètres à l'heure le freinage par l'air comprimé prenait soixante-sept secondes et s'effectuait sur une longueur de 1 600 mètres.

La voiture a une longueur de 23 mètres et est supportée par 2 bogies à 3 essieux, dont 2 sont moteurs. Il y a donc 4 moteurs par voiture. Ces moteurs, d'une puissance de 250 chevaux, sont montés directement sur les essieux, le rotor s'y trouvant calé sans suspension élastique[1] (fig. 377).

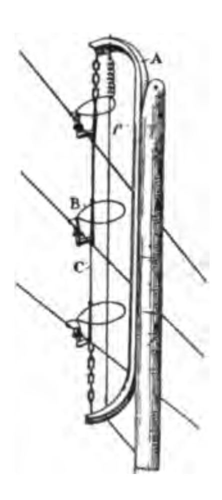


Fig. 375. — Ligne aérienne à 10 000 volts.

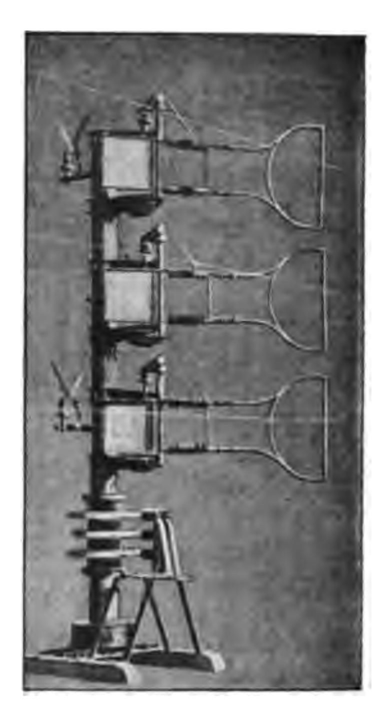


Fig. 376. — Archet.

L'alimentation des moteurs se fait sous deux potentiels distincts que l'on obtient en montant les transformateurs soit en triangle, soit en étoile. On démarre avec 1 150 volts et l'on marche d'une façon normale avec 1 850 volts. Indépendamment de cette variation de voltage on dispose, pour augmenter le couple au démarrage, de résistances que l'on insère sur le circuit

[1] Ce système de suspension n'est pas à imiter. Évidemment il n'a été adopté par la maison Siemens et Halske qu'en raison du caractère absolument temporaire des essais.

des rotors. Les manœuvres des divers appareils se font par l'air comprimé. Le poids de la voiture en charge est de 94 tonnes.

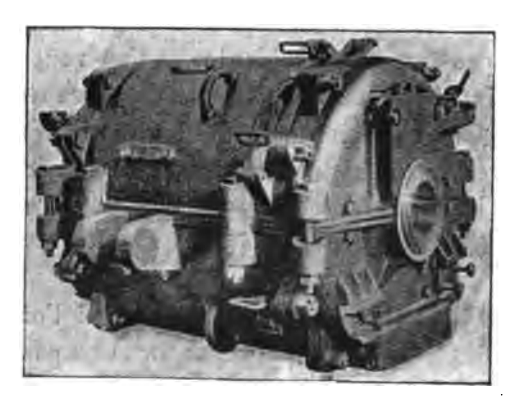


Fig. 377. — Moteur à calage direct sur l'essieu.

Voitures à accumulateurs. — Avec les accumulateurs on peut appliquer la traction électrique à des voies ordinaires, puisque, dans l'hypothèse où nous nous plaçons, la voiture emportera avec elle son réservoir d'électricité. Il faudra, toutefois, que ce réservoir puisse être chargé en des points déterminés, ce qui implique, en tout état de cause, la construction d'une usine électrique ou l'achat de courant à une usine étrangère.

Mais cette commodité d'application se fait payer par des inconvénients nombreux, parmi lesquels nous citerons :

1° *Le poids des accumulateurs.* — Jusqu'à ce moment on n'a trouvé qu'un seul type d'accumulateurs suffisamment pratique. Ce sont des accumulateurs au plomb [1]. La matière première est donc

[1] On peut rappeler, en quelques mots, le principe de fonctionnement des accumulateurs. Considérons un bac rempli d'eau acidulée par de l'acide sulfurique et dans laquelle plongent deux lames de plomb. Si nous faisons passer un courant électrique de l'une à l'autre plaque (on appelle aussi ces plaques des électrodes) l'eau sera décomposée en ses éléments : oxygène et hydrogène. L'oxygène se portera sur l'*anode* (plaques par laquelle le courant arrive) pour former du peroxyde de plomb, tandis que l'hydrogène ira à la *cathode* (plaque par laquelle le courant sort).
Si l'on arrête l'opération on constate entre les deux plaques une différence de

très lourde par elle-même. C'est ainsi que, pour effectuer la traction d'une voiture de 15 à 20 tonnes, il faut de 5 000 à 6 000 kilogrammes d'accumulateurs. Et encore le profil en long de la ligne ne devra-t-il pas être trop accidenté. Si l'on veut remorquer de véritables trains le poids de la batterie devra être fortement augmenté. Et l'on ne pourra plus la loger sur l'automotrice. Il faudra employer des fourgons-porteurs, d'où un accroissement de poids-mort et la nécessité d'augmenter encore la réserve d'électricité à emporter.

2° *Le défaut d'élasticité des batteries.* — Si l'on veut qu'une batterie dure longtemps il faut la ménager et ne pas lui demander d'efforts anormaux. Or, un des grands avantages de l'électricité, en matière de traction de chemin de fer, est justement la possi-

potentiel et l'on peut établir un certain courant entre l'anode (plaque positive) et la cathode (plaque négative). Ce courant a donc été *accumulé*, pendant la charge, d'où le nom d'accumulateur donné à l'appareil. Cette capacité de début est très faible. Mais elle augmente au bout d'un certain nombre de charges et de décharges. Aussi n'emploie-t-on que des accumulateurs ayant été formés, c'est-à-dire ayant été chargés et déchargés un certain nombre de fois. C'est là ce que l'on appelle la *formation Planté*. On peut en abréger la durée en employant non des plaques de plomb, homogène, mais des plaques de plomb recouvertes d'oxyde de plomb. D'où, à côté des accumulateurs genre Planté, les *accumulateurs à oxyde*, qui ont une plus grande capacité, mais qui sont beaucoup plus fragiles, l'oxyde ayant tendance à se détacher de la plaque. L'expérience prouvant que les plaques positives se détériorent plus facilement que les plaques négatives, on a été amené à combiner des *accumulateurs mixtes*, savoir, genre Planté pour la plaque positive, et oxyde pour la plaque négative.

Un accumulateur, chargé à refus, présente une force électro-motrice de 2.6 volts. Mais il ne peut la conserver longtemps et, à la décharge, celle-ci tombe rapidement à 2 volts pour décroitre ensuite lentement jusqu'à 1,85 volt, point où il faut arrêter la décharge, pour éviter la sulfatation des plaques.

En partant de ce voltage minimum, on voit que, pour atteindre 500 volts, il faudra réunir en tension 270 éléments. Un ensemble d'accumulateurs ainsi réunis forme une *batterie*.

S'il s'agit d'un service indépendant on ne sera pas obligé d'employer des tensions de 500 volts. En se limitant à 100 ou 200 volts on diminuera sensiblement le nombre des éléments. Mais leur poids devra être augmenté.

En général on fait travailler les batteries pour traction à 2 ampères par kilogramme de plaque et l'on peut, dans ces conditions, compter sur ce débit de 2 ampères, pendant 4 à 5 heures. On en déduira le poids de la batterie à employer pour effectuer un service donné. Au moment des démarrages le débit peut atteindre 4 à 5 ampères par kilogramme de plaques. Certains accumulateurs spéciaux débitent *normalement* de 3 à 4 ampères par kilogramme de plaques. Mais ils coûtent cher et sont d'un entretien dispendieux.

bilité que donne le moteur électrique de développer, avec la plus grande aisance, des efforts de traction de 10 à 12 fois plus considérables que l'effort normal. Nous avons vu que des démarrages rapides nécessitaient des efforts de 40 à 50 kilogrammes par tonne, alors que l'effort de traction, même à une allure de 60 à 80 kilomètres à l'heure, n'est que de 4 à 5 kilogrammes. Des écarts analogues existent, dès qu'il faut aborder des rampes de 3 à 4 centimètres par mètre. Il en résulte qu'à moins d'emporter des batteries beaucoup plus puissantes qu'il ne le faut, on ne doit pas songer à demander fréquemment aux accumulateurs des variations de débit aussi considérables. Le rendement devient déplorable et la batterie se désagrège avec rapidité.

En fait, alors que la distribution de l'électricité par conducteurs aériens ou par 3e rail assure une traction d'une souplesse quasi-prodigieuse, l'emploi de batteries alourdit l'exploitation et paralyse le développement du trafic.

3° *Le coût d'entretien des batteries.* — Deux raisons surtout font que le coût d'entretien est très élevé : 1° les variations de débit, 2° les trépidations de la voiture.

Nous avons déjà dit que les accumulateurs ne pouvaient pas subir de très grandes variations de débit.

Quant aux trépidations elles sont nuisibles en ce sens que les accumulateurs ne sont pas constitués uniquement par des plaques de métal. Ce sont — au moins pour les plaques négatives — des plaques quadrillées, grillagées, etc., dans les vides desquelles on a introduit de l'oxyde de plomb. Or, même quand les batteries sont à poste fixe, cet oxyde tend à se désagréger. La détérioration de la plaque sera donc encore plus rapide si, en même temps qu'elle est exposée à de forts débits, elle doit supporter d'incessantes vibrations, sans compter les chocs brusques au passage des aiguilles ou à l'entrée dans les courbes.

Il n'est pas étonnant que, dans ces conditions, une batterie

pour traction ne dure que très peu de temps. Au bout de 10 à 20 000 kilomètres une batterie doit faire l'objet d'une revision générale, le plus grand nombre des plaques positives étant alors hors de service.

4° *Le mauvais rendement des batteries.* — Il y a une grande différence entre le régime d'une batterie, sur une voiture, et celui d'une batterie-tampon dans une usine. Alors que la seconde est à poste fixe et ne corrige que des écarts de débit, ne donnant généralement qu'une partie de sa capacité, la batterie pour traction doit être, à la charge, poussée jusqu'au refus, afin d'emporter une plus grande provision d'électricité et, d'autre part, elle revient à l'usine à peu près vidée, ayant eu à supporter de gros débits. La conséquence est que le rendement en énergie qui, pour une batterie-tampon, s'élève assez facilement à 80 et 87 p. 100 descend, avec une batterie pour traction, à 65 et même 60 p. 100.

Ces diverses raisons expliquent surabondamment pourquoi la traction par accumulateurs s'est très peu développée sur les chemins de fer. Elle n'y est nullement à sa place, malgré deux avantages que l'on peut faire valoir : (*a*) la possibilité d'éviter des pertes rhéostatiques au moment du couplage série-parallèle en sectionnant la batterie ; par exemple, s'il s'agit d'une batterie à 500 volts, on la partagera en quatre sections donnant chacune 125 volts et l'on pourra alimenter les moteurs à 125, 250, 375 et 500 volts ; (*b*) l'emmagasinement, dans la batterie, de l'électricité que peuvent produire les moteurs dans les descentes, au moment où ils *récupèrent*. Mais encore faut-il que ceux-ci soient combinés en vue de cette récupération, ce qui comporte des types spéciaux (moteurs shunt ou à excitation indépendante).

Sur un certain nombre de lignes de tramways, des accumulateurs ont été employés. Mais ils ont été presque toujours imposés, les exploitants ne pouvant installer de fils aériens et ne voulant pas, d'autre part, procéder à l'établissement coûteux d'un cani-

veau. Pour un chemin de fer qui jouit d'une plate-forme indépendante et qui n'a pas à compter avec les exigences souvent excessives dont ont fait preuve les municipalités à l'égard des Compagnies de tramways, la question économique intervient seule. Elle se trouve par suite tranchée dans le sens de la négative et il faudrait des circonstances bien spéciales, pour que la traction par accumulateurs dût être préférée à la traction par trolley ou par 3e rail.

On a proposé d'effectuer avec les accumulateurs une traction de luxe, c'est-à-dire d'organiser sur les grandes lignes où fonctionnent encore les locomotives à vapeur et où la transformation générale de la traction ne peut être actuellement envisagée des trains spéciaux à grande vitesse et évitant aux voyageurs les inconvénients bien connus des locomotives à vapeur, en ce qui concerne les trépidations, les mouvements de lacets, les fumées, les escarbilles, etc... Il peut se faire qu'en demandant des prix de transport très élevés on puisse faire face aux dépenses particulièrement élevées de la traction par accumulateurs. Mais c'est là un des petits côtés de la question.

Qu'il s'agisse, d'ailleurs, soit d'un service analogue, soit d'une exploitation d'essai comme on a voulu en réaliser sur certaines lignes à vapeur, on ne peut considérer la traction par accumulateurs que comme un système transitoire et non susceptible (du moins tant que l'on n'aura à sa disposition que les accumulateurs actuels) d'un développement pratique quelconque.

Aussi jugeons-nous inutile d'entrer dans de longues explications relativement à ce mode de traction et nous nous bornerons à faire connaître les dispositions générales d'un ou deux types d'automotrices, spécialement combinées en vue d'un tel système.

Nous citerons d'abord les voitures de la *ligne de Milan à Monza* (fig. 378 et 379) qui ont été mises en service par la *Société des Chemins de fer de la Méditerranée* à la suite des travaux d'une commission spéciale, nommée en 1897, par le gouvernement

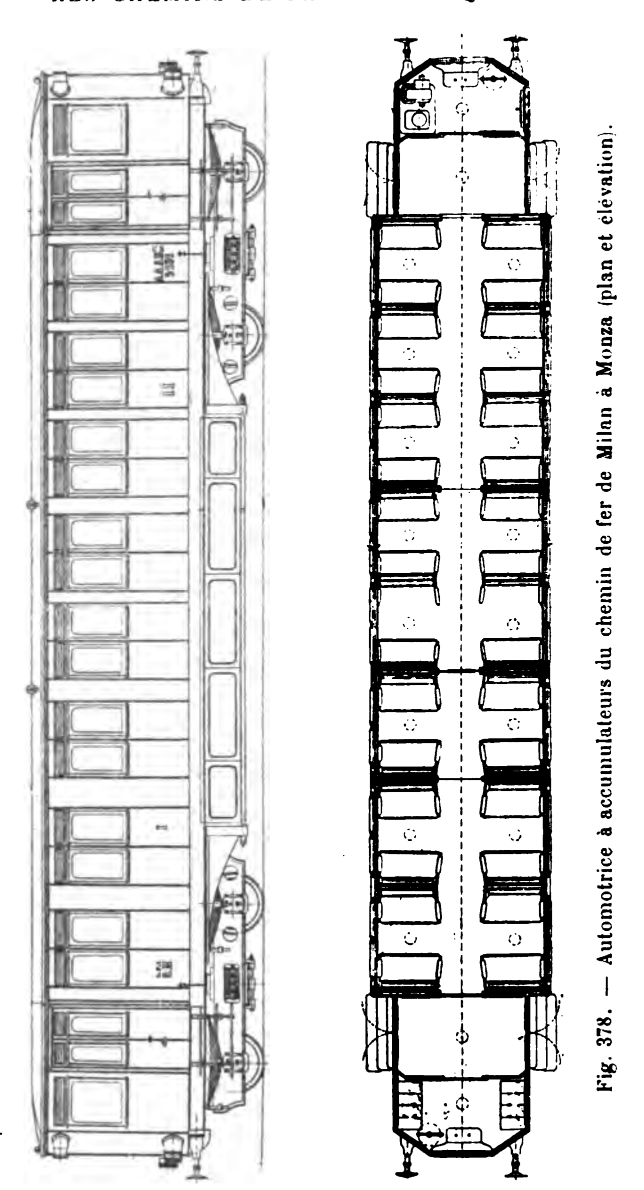


Fig. 378. — Automotrice à accumulateurs du chemin de fer de Milan à Monza (plan et élévation).

italien et qui ont abouti à la mise en pratique, à titre d'essai,

sur quelques lignes italiennes, des divers systèmes de traction des trains par l'électricité (accumulateurs, 3e rail, courants triphasés à haute tension, etc.).

La distance de Milan à Monza n'est que de 13 kilomètres et la ligne est sensiblement en palier. Le service électrique est assuré par des automotrices à bogies (sans remorque), ayant entre tampons une longueur de 18,50. La disposition intérieure est celle des voi-

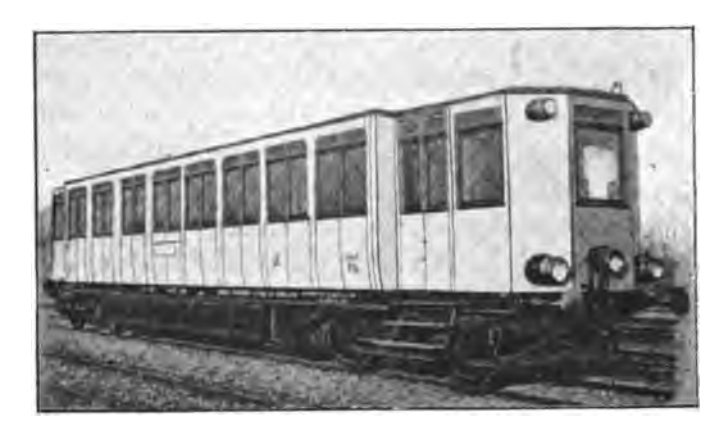


Fig. 379. — Automotrice à accumulateurs du chemin de fer de Milan à Monza. Vue d'ensemble.

tures américaines. Le nombre des places est de 88 dont 24 debout.

Entre les bogies, dont la distance d'axe en axe est de 12 mètres, et dans deux caisses suspendues aux longerons sont logés les accumulateurs, divisés en deux batteries de 65 éléments. Chaque élément comporte 11 plaques positives, type Planté, et 12 plaques négatives à oxyde, pesant en tout 105 kilogrammes. Le poids total des plaques est de 13 650 kilogrammes et la batterie, avec tous ses accessoires, pèse 18 000 kilogrammes. Une petite batterie supplémentaire, pesant 500 kilogrammes, assure le service de l'éclairage.

Les moteurs ont une puissance de 50 chevaux et sont au nombre de deux, à raison d'un par bogie, soit 100 chevaux pour la voiture entière. A l'avant et à l'arrière se trouvent deux cabines de

manœuvre, la voiture devant pouvoir marcher, sans être retournée, dans les deux sens.

Le poids total est de 58 000 kilogrammes, savoir :

Voiture proprement dite	34 000	kilogrammes.
Moteurs, résistances, appareils de manœuvre, compresseur d'air, etc	5 500	—
Batterie d'accumulateurs pour la traction	18 000	—
Batterie pour l'éclairage	500	—
Total. . .	58 000	kilogrammes.

Soit 66 tonnes en charge.

Quant à la manœuvre des moteurs elle se fait selon la méthode série-parallèle, sans que l'on ait recours au sectionnement de la batterie pour diminuer les pertes rhéostatiques.

La charge des accumulateurs a lieu dans la gare centrale de Milan, à la tension de 350 volts. Elle dure 1 heure et demie, les accumulateurs restant sur la voiture. Pendant ce temps un ventilateur chasse les gaz qui se dégagent des batteries.

Le courant moyen de décharge, entre Milan et Monza est de 300 ampères, correspondant à 2,87 amp. par kilogramme d'électrode, la tension s'abaissant alors à 230 volts. Pendant les démarrages un débit plus intense est demandé à la batterie ; il atteint de 350 à 400 ampères (de 3,33 amp. à 3,80 amp. par kg. d'électrode).

La batterie peut, sans être rechargée, faire deux voyages aller et retour.

On a constaté qu'à l'aller la consommation aux bornes de la batterie était de 65 kilowatts et au retour de 55 kilowatts correspondant, avec une vitesse moyenne de 40 kilomètres à l'heure, à une consommation de 26 watts-heure par tonne-kilomètre[1].

Sur la ligne de Bologne à San-Felice on a mis également en service des voitures à accumulateurs. Les dispositions intérieures des voitures rappellent, comme celles de Milan à Monza, le type américain. Le poids est de 38 000 kilogrammes, comprenant :

[1] *Revue générale des chemins de fer*, décembre 1899.

Caisse et bogies	20 000	kilogrammes.
Moteurs et appareils divers	5 000	—
Batterie	8 000	—
Poids à vide	33 000	kilogrammes.
Voyageurs et bagages.	5 000	—
Total. . .	38 000	kilogrammes.

Les accumulateurs, du type Pescetto (à oxyde) sont répartis en 280 éléments représentant chacun un poids d'électrode de

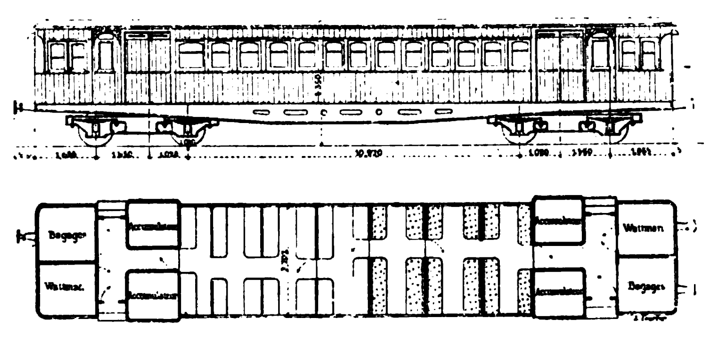


Fig. 380. — Automotrice à accumulateurs de l'État Belge.

21,420 kg. La capacité de chaque élément serait de 180 ampères-heure à raison de 8,6 amp. par kilogramme de plaque pendant 2 heures et demie. Le régime moyen ne serait que de 4 ampères, chiffre d'ailleurs déjà très élevé.

La batterie a, une fois chargée, un potentiel de 500 volts. On la divise, au moment des démarrages en trois sections donnant 170, 250 et 500 volts.

Nous citerons enfin une grande voiture d'essai de l'État Belge (fig. 379) offrant cette particularité que l'équipement électrique a été combiné également pour permettre la traction par trolley ou par 3e rail. La voiture pèse, à vide, 48 tonnes. Les accumulateurs sont logés dans quatre compartiments ménagés aux quatre angles de la voiture. Il y a 160 éléments donnant une tension de 350 volts.

Accessoires des voitures automotrices. — Nous avons déjà fait connaître les parties principales de l'équipement électrique des voitures automotrices. Nous devons encore dire quelques mots du mode de freinage, et de l'intervention de l'électricité pour l'effectuer avec commodité et sécurité.

Tout d'abord les moteurs eux-mêmes peuvent servir de frein soit par la marche arrière (trop brutale), soit par la marche des moteurs en court circuit ou sur des résistances. Mais ces divers systèmes ont l'inconvénient de fatiguer beaucoup les moteurs et on préfère se servir de freins électro-magnétiques qui ne soumettent les moteurs à aucun régime excessif. Ces freins se composent d'électro-aimants disposés en regard de plateaux métalliques montés sur les roues et par lesquels le circuit magnétique peut se fermer, s'opposant au déplacement du plateau et par suite de la roue. Les électro-aimants sont excités par le courant même que peuvent produire les moteurs, pendant le temps où, après avoir été isolés de la ligne, ils tournent encore sous l'influence de la vitesse acquise. Ils fonctionnent alors comme des générateurs d'électricité, mais en produisant un courant d'intensité variable, en raison de la décroissance de vitesse de la voiture. Un tel freinage, énergique au début, devient par suite un peu mou pendant la dernière période de l'arrêt et l'on doit mettre alors en action les freins ordinaires à main. Malgré ce petit inconvénient, le freinage électro-mécanique est d'un emploi avantageux, en ce sens qu'il n'occasionne aucune usure de matière.

La C[ie] Westinghouse a combiné un frein électro-magnétique très énergique, agissant sur les rails et sur la jante des roues (fig. 381). Il comporte, par suite, des sabots pouvant s'appliquer, à la façon ordinaire, sur la jante des roues et deux autres sabots suspendus à peu de distance au-dessus du rail. Des électro-aimants susceptibles d'être excités par le courant des moteurs, au moment du freinage, sont montés sur ces derniers sabots créant deux pôles magnétiques de sens inverse, se fermant par les rails. L'ap-

plication des sabots sur les rails produit, par un mouvement de levier, le serrage des sabots de jante. Le frein ainsi imaginé est donc à double effet.

Les deux systèmes ci-dessus supposent l'emploi de courants continus ; mais on peut également combiner des freins électro-magnétiques s'appliquant aux courants alternatifs, sans compter

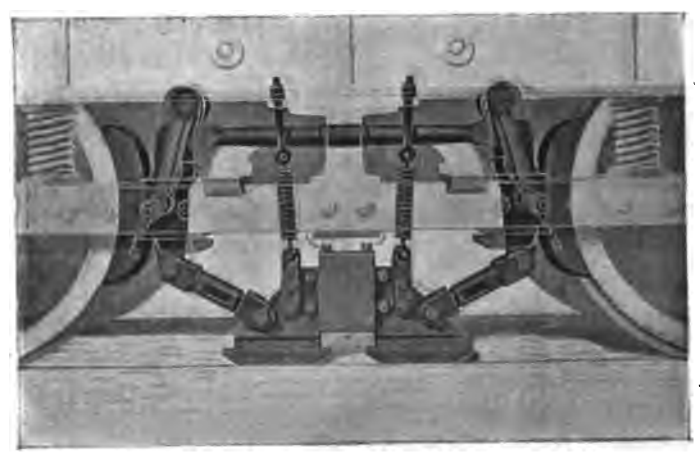


Fig. 381. — Frein électro-magnétique Westinghouse.

qu'il serait possible, comme nous le dirons, plus loin, en parlant du chemin de fer de la Jungfrau, de bobiner les rotors de manière à leur faire produire du courant continu. De plus, on dispose d'un moyen particulièrement commode de ralentissement dans la récupération, combinée ou non avec le groupement en cascade.

Le freinage électrique, malgré ses grands avantages, n'est pas néanmoins très employé, parce qu'il convient surtout pour des automotrices et que, dans les chemins de fer, la traction s'opère généralement par trains. C'est à l'air comprimé que l'on a presque toujours recours, mais l'électricité ne reste pas étrangère à l'application de ce système si sûr et si pratique, en ce sens que c'est elle qui comprime l'air nécessaire au freinage. On emploie, à cet effet, des compresseurs électriques, branchés sur le courant de

la ligne et qui sont constitués par un moteur électrique actionnant une pompe à air (fig. 382). Un interrupteur automatique coupe le courant, dès que la pression de l'air dépasse celle admise dans le réservoir principal (de 6 à 7 kilogrammes). Un compresseur électrique ainsi combiné est donc très simple. Mais l'expérience prouve que les bons compresseurs électriques sont assez rares. On fera bien d'apporter toute son attention à cette partie de l'équipement, car, en cas de mauvais fonctionnement, l'air peut manquer subitement et mettre le conducteur du train dans un grand embarras. Au contraire un bon système de freinage lui donne une grande confiance pour la conduite de ses voitures.



Élévation.



Vue du compresseur, le moteur électrique étant enlevé.

Fig. 382. — Compresseur électrique Christensen.

Le compresseur d'air peut se loger soit dans la cabine du wattman, si on dispose à cet effet d'une place suffisante, soit sous la caisse de la voiture. Mais la première disposition est encore préférable, car elle facilite la surveillance de l'appareil.

Le compresseur électrique étant susceptible de fournir en très peu de temps de grandes quantités d'air comprimé, il est loisible d'employer l'air en excès, soit pour actionner le sifflet de l'automotrice (qui remplace, ici, le sifflet à vapeur), soit pour faciliter l'action de la sablière, l'air comprimé intervenant, dans ce dernier cas, pour chasser énergiquement le sable et en poudrer le rail bien uniformément.

Dans un chemin de fer électrique, c'est encore l'électricité de

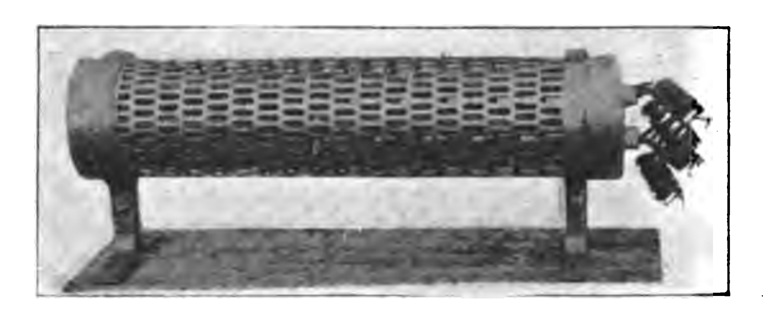


Fig. 383. — Radiateur pour le chauffage des voitures.

la ligne qui assurera l'éclairage et le chauffage des voitures. Il ne sera donc pas difficile d'avoir, dans ces conditions, un éclairage très abondant. Quant au chauffage il sera assuré par des radiateurs, que l'on installera sous les banquettes (fig. 383). Cela est préférable aux radiateurs placés simplement sous les pieds des voyageurs, l'isolement étant alors d'un maintien difficile. A titre d'indication sur la consommation des radiateurs, nous citerons celle observée sur le Manhattan Railway (New-York) qui est de 24 ampères par voiture, par les plus grands froids.

Il est économique de prévoir des radiateurs à « échelons », c'est-à-dire de les constituer par des bobines que l'on insère dans le circuit en nombres variables, selon la température extérieure. Les radiateurs du Manhattan sont divisés, notamment, en série de 3, 8 et 16 bobines.

CHAPITRE IX

LOCOMOTIVES ÉLECTRIQUES

Dispositions générales. Locomotives avec générateurs d'électricité. Locomotives à accumulateurs. Locomotives de manœuvre. Locomotives pour trains légers. Locomotives pour trains lourds. *a*) Locomotives américaines. *b*) Locomotives de la Cie des Chemins de fer d'Orléans. *c*) Locomoteurs de la Cie des Chemins de fer de l'Ouest. Locomotives à courants alternatifs. *a*) Locomotives à courants triphasés et basse tension (Thoune à Burgdorf). *b*) Locomotives à courants triphasés et haute tension (chemin de fer de la Valteline). Locomotives à grande vitesse et haute tension.

Dispositions générales. — La locomotive électrique est d'une construction beaucoup plus simple que la locomotive à vapeur. De plus elle ne nécessite pas de tender.

Imaginons un simple truck à deux essieux et plaçons en regard de chaque essieu un moteur électrique, avec attaque des essieux par engrenages. Pour compléter la locomotive il suffira de monter sur le milieu du truck une cabine qui renfermera les appareils de manœuvre. Quant aux résistances, on les installera sur le truck, de chaque côté de la cabine, en les recouvrant par un couvercle en tôle, incliné vers les extrémités, de manière à assurer l'écoulement de l'eau et à laisser la voie bien visible pour le conducteur (fig. 384).

Parmi les accessoires il en est un qui devra remplacer le sifflet à vapeur. En Amérique on se sert souvent de cloches que l'on met en mouvement à la main ; mais on se rapprochera davantage du son produit par le sifflet à vapeur, en ayant recours à l'air comprimé, méthode d'autant plus commode à employer que les loco-

motives sont généralement munies d'un compresseur électrique, en vue d'effectuer la compression de l'air nécessaire à la manœuvre des freins.

La prise de courant se fera dans le cas du 3e rail par un frotteur, et si la distribution est aérienne, par une navette, un trolley ou un archet.

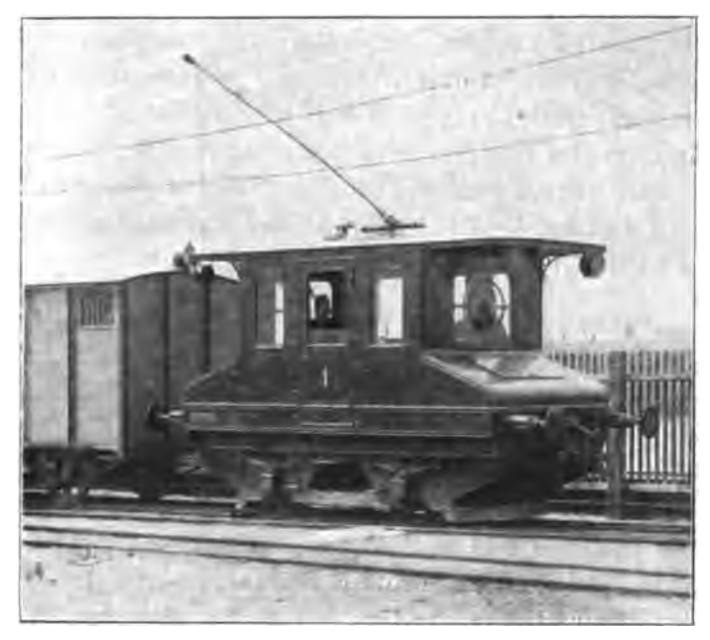


Fig. 384. — Disposition d'ensemble d'une locomotive électrique.

Les moteurs se monteront intérieurement aux essieux. Cette disposition est préférable à celle qui consiste à placer les moteurs en dehors, la machine étant alors moins bien équilibrée et ayant une certaine tendance à prendre du balancement. Quant au choix à faire entre l'attaque directe des essieux ou l'attaque par engrenages, nous avons déjà dit les arguments qui militaient. selon les cas, en faveur de l'un ou l'autre système.

Si la résistance à vaincre est considérable, une locomotive à

deux essieux sera généralement insuffisante. Non pas que l'on ne puisse la munir de moteurs aptes à réaliser l'effort de traction nécessaire ; mais on arriverait alors à un poids, par essieu, incompatible avec la conservation de la voie[1]. Il se produirait un martelage aux joints des rails, sans compter, dans les parties en souterrain, des vibrations qui pourraient se transmettre aux maisons riveraines.

La locomotive à bogies donne alors une solution tout à fait satisfaisante, ayant, en outre, l'avantage de permettre une meilleure inscription de la machine dans les courbes.

Enfin, pour les très grandes puissances, on arrivera à la locomotive à 6 essieux, ou encore, comme on l'a fait récemment pour les trains du tunnel de Baltimore, à deux locomotives manœuvrables à l'aide d'un appareil unique.

Locomotives avec générateurs d'électricité. — Un tel type ne rentre pas dans les données générales ci-dessus. Mais il constitue une exception présentant, au moins, un certain intérêt historique.

A cette classe se rattache la locomotive Heilmann, qui a été essayée pendant quelque temps par la Cie des Chemins de fer de l'Ouest. Le principe est de produire sur la locomotive même, à l'aide de dynamos que mettent en mouvement des machines à vapeur, l'électricité nécessaire à la marche des moteurs.

La locomotive Heilmann comporte donc : une chaudière (qui n'est autre qu'une chaudière de locomotive) un groupe générateur comprenant : moteur à vapeur et génératrices ; un groupe excitateur, constitué par un moteur à vapeur et une dynamo ; enfin un groupe moteur.

On aurait pu, en prenant des génératrices auto-excitatrices, supprimer le groupe excitateur, mais ce dernier est nécessaire en raison du mode de réglage adopté et qui est d'ailleurs l'une des particularités à signaler de la locomotive Heilmann.

[1] En général on ne dépasse pas 15 tonnes par essieu.

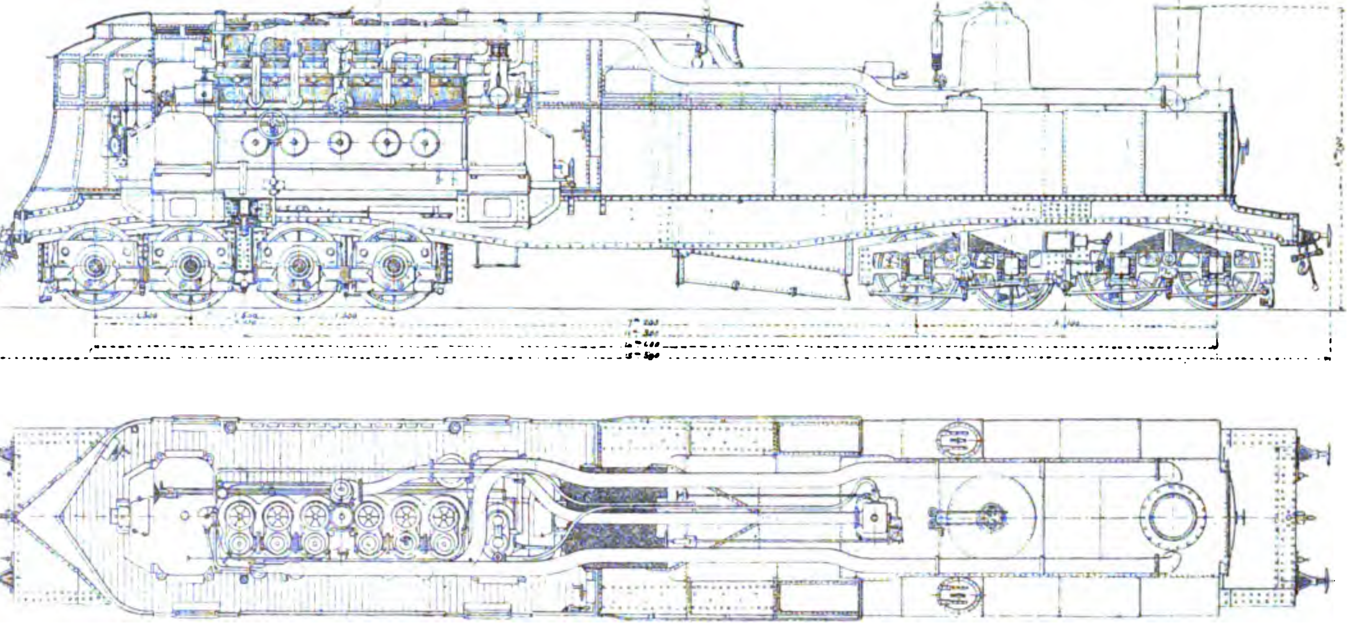


Fig. 385. — Locomotive Heilmann (plan et élévation).

Deux types de locomotive, ne différant entre eux que par la puissance, ont été mis en service. Le dernier type est représenté par la figure 385. La longueur de la machine entre tampons est de 18,590 m. A l'avant se trouve la partie électrique avec la cabine de l'électricien ; la chaudière se trouve à l'arrière et l'ensemble rappelle un peu une locomotive ordinaire avec un tender que l'on aurait retourné bout pour bout, de manière à marcher tender en avant.

Un longeron unique, très résistant, supporte, de chaque côté, toute l'installation et en reporte le poids à l'avant sur quatre roues motrices et à l'arrière sur quatre roues non motrices.

L'avant de la machine est, d'autre part, disposé en pointe, pour permettre de diminuer la résistance de l'air aux grandes vitesses.

La vapeur est produite, à la pression de 14 kilogrammes, et alimente une machine verticale Willans-Robinson de 1 400 chevaux, à six cylindres orientés selon l'axe longitudinal et tournant à la vitesse normale de 400 tours par minute. Par ses deux extrémités l'arbre actionne directement une dynamo à courant continu Brown-Boveri, de 450 volts et 1 000 ampères, mais pouvant en fournir momentanément 2 000. Les deux dynamos marchent en parallèle.

Le groupe excitateur est constitué par une dynamo Compound de 140 ampères, 115 volts, actionnée par une machine Willans de 28 chevaux.

Les moteurs (excitation série) sont montés concentriquement aux essieux sur un tube creux laissant entre ce tube et les essieux un jeu supérieur à celui que prend le châssis auquel les moteurs sont suspendus, par rapport aux boîtes à huile.

L'entraînement des roues est assuré par des croisillons dépendant de l'induit et qui viennent appuyer sur des tampons à ressort fixés aux raies des roues. L'attaque se fait ainsi en douceur et facilite les démarrages (fig. 386).

Grâce à l'excitation indépendante, ce démarrage se produit

avec une grande aisance et sans appel exagéré de force motrice. Il suffit, en effet, de diminuer la tension du courant d'excitation par un rhéostat pour faire baisser également la tension de la génératrice ; le nombre d'ampères débité par celle-ci est alors très élevé, sous un faible voltage, et ces conditions sont tout à fait propices, comme on l'a vu précédemment, pour déterminer, dans les moteurs, un effort de traction très énergique. Ce système

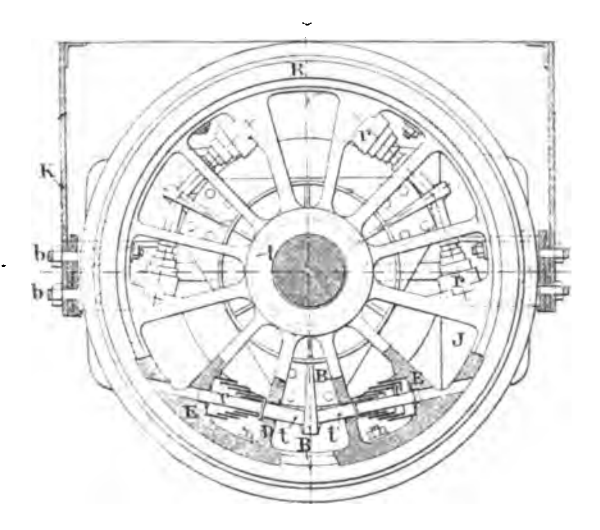


Fig. 386. — Mode d'entrainement des roues.

permet, d'autre part, de marcher constamment avec la machine à vapeur, avec admission constante, ce qui est encore une cause de bon rendement.

Toutes ces dispositions sont très ingénieuses et elles ont eu le mérite d'appeler l'attention générale sur les avantages bien spéciaux de la locomotive électrique. M. Clérault, ingénieur en chef de la Cie de l'Ouest les a exposés très clairement au *Congrès des Chemins de fer*, de 1895.

« Il est certain, a-t-il dit, qu'au point de vue mécanique la locomotive à vapeur présente un inconvénient radical auquel,

malheureusement, il n'a jamais été possible de remédier : c'est la dépendance absolue du nombre de coups de piston et du nombre de tours de roue ; en sorte que lorsque la locomotive ralentit sa marche, par exemple à la montée d'une rampe, le nombre de kilogrammètres à l'heure diminue, et pour compenser cette diminution de travail on est obligé d'augmenter l'admission et par conséquent la consommation relative de vapeur.

« L'indépendance absolue qui existe dans la locomotive Heilmann entre le moteur et le récepteur fait que, quand on a besoin de produire plus de travail, on laisse la détente constante et on accélère le générateur. On peut par conséquent produire, dans un temps donné, un travail plus considérable ».

D'autre part M. Mazen, ingénieur à la Cie de l'Ouest, a montré, par des chiffres très concluants, que la résistance de la locomotive au roulement était bien inférieure à celle d'une locomotive ordinaire. C'est ainsi qu'il a trouvé que, pour une vitesse de 62,5 km. à l'heure, la résistance au roulement atteignait :

11,2 kg.	par tonne,	pour une locomotive à vapeur.
5,1	—	pour la locomotive électrique.
4,5	—	pour les voitures remorquées.

En d'autres termes la résistance au roulement de la locomotive électrique est sensiblement comparable à celle des automotrices.

Il s'ensuit, comme l'a fait remarquer encore M. Clérault que, sur la plupart des pentes, on peut arrêter la machine à vapeur et procéder au graissage des différents organes, alors qu'il faut encore consommer de la vapeur avec une locomotive ordinaire.

Il est clair, cependant, qu'un pareil système ne pourra jamais être mis en parallèle, pour une exploitation courante, avec celui qui consiste à alimenter la locomotive par un 3e rail ou des conducteurs aériens. Il faut remarquer, en effet, qu'il n'utilise qu'une partie des merveilleux avantages de l'électricité, c'est-à-

dire son adaptation si remarquable à la traction des véhicules. Il laisse subsister l'usine ambulante que constitue la locomotive à vapeur et dont le rendement, même avec le système si ingénieux de démarrage qu'a appliqué M. Heilmann, est forcément inférieur à celui d'une grande usine fixe. Or, du moment où l'on a trouvé le moyen de distribuer l'électricité sûrement et économiquement à de grandes distances, la locomotive Heilmann, avec sa génération spéciale d'électricité, ne pouvait plus être considérée que comme une machine d'expérience, mettant bien en évidence les qualités spéciales des moteurs électriques et permettant de chiffrer les avantages généraux qui résulteraient, pour une ligne donnée, de la transformation radicale du système de traction. Aussi, bien que les essais de l'Ouest aient démontré que la locomotive Heilmann pouvait, à tous les points de vue, soutenir la comparaison avec la locomotive à vapeur, tout s'est borné à des essais et lorsque la Compagnie a eu à appliquer l'électricité à sa nouvelle ligne de Versailles, elle a naturellement employé des locomotives avec distribution du courant par 3e rail.

Locomotives à accumulateurs. — Les locomotives à accumulateurs ne peuvent être également considérées que comme un système de transition, qui a permis à certaines Compagnies, alors qu'elles hésitaient devant les dépenses inhérentes à une transformation générale, de se rendre compte, néanmoins, des avantages si nombreux de la traction électrique.

Il est d'ailleurs à remarquer que les considérations qui ont fait parfois appliquer les accumulateurs pour la traction des tramways n'existent plus pour un chemin de fer. En effet, quand on a dû préférer les tramways à accumulateurs aux tramways à trolley, des raisons d'esthétique sont seulement entrées en jeu, les concessionnaires s'étant trouvés en présence d'un refus péremptoire, de la part des municipalités, d'autoriser l'emploi de conducteurs aériens dans les rues suivies par le tramway. Or un chemin de

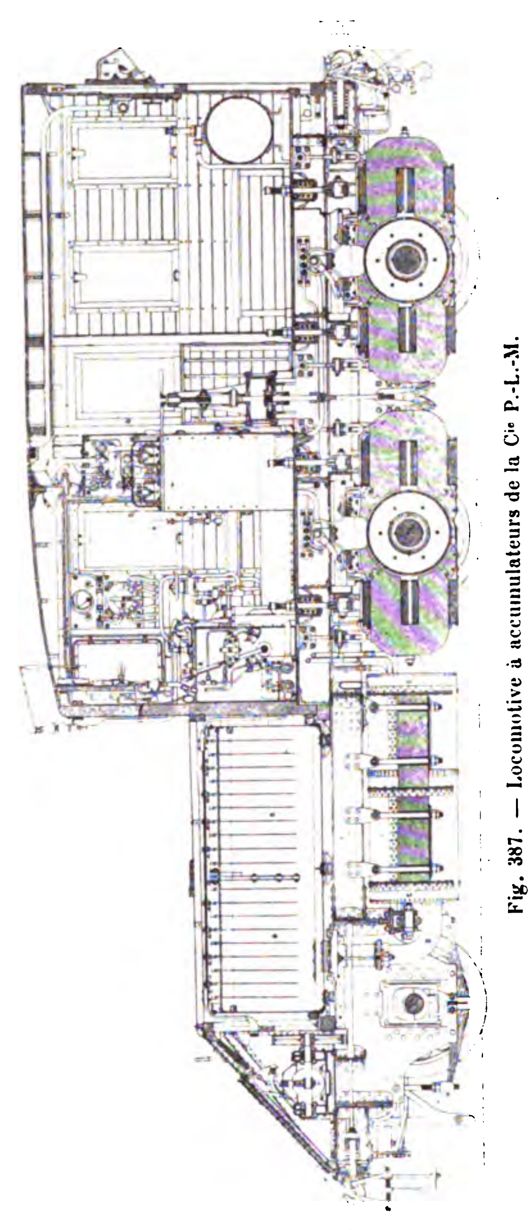
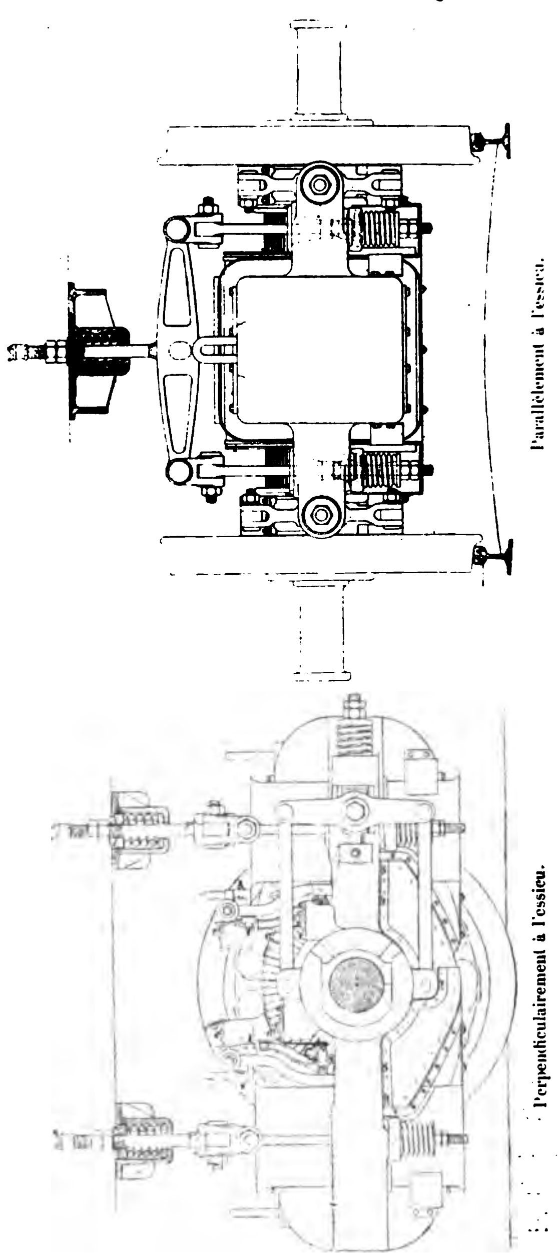


Fig. 387. — Locomotive à accumulateurs de la Cie P.-L.-M.

fer, qui jouit d'une plate-forme indépendante, n'a pas devant lui de sujétions semblables.

Dès lors, du moment qu'il est possible d'appliquer les conducteurs aériens ou le 3e rail, l'emploi d'accumulateurs, c'est-à-dire d'un système inutilement coûteux, se trouve très nettement écarté. Du reste si, sur certaines lignes à profil un tant soit peu accidenté, il pouvait venir à l'idée de recourir à des accumulateurs, on se trouverait en présence d'une augmentation de poids mort, telle qu'un semblable projet devrait être forcément abandonné. Sur les métropolitains, en particulier, une exploitation par accumulateurs serait littéralement ruineuse, sans compter que les démarrages et les arrêts occasionneraient une désagrégation rapide des batteries. Nous renvoyons,



Parallèlement à l'essieu.

Perpendiculairement à l'essieu.

Fig. 388. — Suspension du moteur.

à ce propos, aux considérations que nous avons déjà développées, en parlant des automotrices à accumulateurs, considérations qui s'appliquent tout aussi bien à des locomotives.

Nous nous bornerons à citer, comme locomotive à accumulateurs, celle avec laquelle la Cie P.-L.-M. a procédé à des essais de grande vitesse.

Cette locomotive est à 3 essieux dont un porteur et deux moteurs (fig. 387). Les moteurs électriques, qui ont été fournis par la maison Sautter, Harlé et Cie, sont à induit claveté directement sur l'essieu. Ils sont bipolaires et la suspension des inducteurs (fig. 388) permet à ceux-ci de rester toujours concentriques à l'induit. La puissance de chaque moteur est de 300 chevaux.

Le courant est fourni par la batterie d'accumulateurs, à la tension de 360 volts. Le nombre des éléments de cette batterie est de 192. Chaque élément (type Fulmen) comporte 90 kilogrammes de plaque et peut fournir 1 000 ampères-heure, au régime moyen de 500 ampères. A ce moment les accumulateurs travaillent donc à raison de 5,5 ampères par kilogramme de plaque.

Cette batterie est placée dans un fourgon spécial attelé à la locomotive. Sur la locomotive même, il existe une autre batterie de 18 éléments, à 140 kilogrammes de plaques, servant pour l'excitation des moteurs, la compression de l'air et l'éclairage. L'excitation indépendante des moteurs rend possible, comme on l'a dit précédemment, la récupération de l'énergie.

La batterie de la locomotive, quoique ne renfermant que 18 éléments, permet, néanmoins, de faire marcher la machine à la vitesse de 5 à 6 kilomètres à l'heure. La locomotive peut donc se déplacer, même sans son fourgon.

La manœuvre des moteurs se fait à l'aide d'un *coupleur* et par le *système série-parallèle*. Toutefois on profite de ce que la batterie d'alimentation permet d'obtenir un voltage variable pour diminuer l'importance des pertes rhéostatiques. A cet effet, au

moment du démarrage, la grande batterie de 192 éléments est découplée et divisée en deux batteries de 96 éléments, montées en parallèle. La tension du courant d'alimentation se trouve donc réduite de moitié. On revient au montage en série, dès que le démarrage a commencé. Malgré cet artifice, un rhéostat de démarrage est indispensable. Il est constitué par des lames de plomb baignant dans une dissolution de carbonate de soude. Une grande cuve en tôle, placée à l'avant de la machine, sur taquets isolants, contient cette dissolution.

Avec les moteurs couplés en parallèle on a pu atteindre facilement, en palier, la vitesse de 100 kilomètres à l'heure, la locotive remorquant alors 100 tonnes, y compris le fourgon à accumulateurs pesant 45 800 kilogrammes.

Quant au poids de la locomotive elle-même, il est de 45 800 kilogrammes. Les essais effectués avec cette locomotive entre Paris et Melun ont non seulement montré que la vitesse ci-dessus indiquée de 100 kilomètres à l'heure pouvait être normalement réalisée, mais qu'elle eût même pu être dépassée sans la baisse de potentiel de la batterie d'accumulateurs. La résistance au roulement a été un peu inférieure à 4,5 kg. par tonne, à la vitesse de 90 kilomètres à l'heure.

Locomotives de manœuvre. — Lorsque la locomotive ne doit servir que pour effectuer des manœuvres dans des gares ou dans des ateliers, il n'est pas nécessaire qu'elle ait une grande puissance.

Par conséquent une locomotive à deux essieux sera alors suffisante et même on pourra parfois n'employer qu'un seul moteur. Dans ce cas, au démarrage par série parallèle, on devra substituer le démarrage rhéostatique, c'est-à-dire que l'on absorbera uniquement par un rhéostat la tension en excès du début de la mise en route.

La figure 389 montre un arrangement de cette nature adapté, par les ateliers d'Œrlikon, à un simple truck à marchandises pour

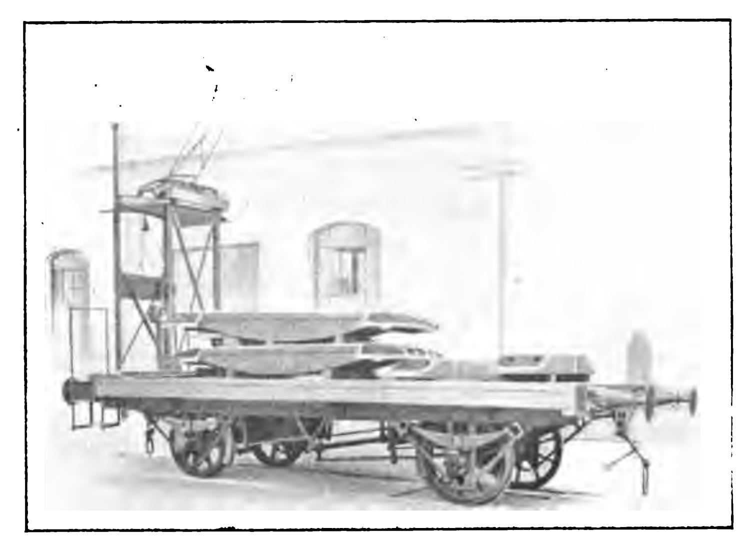


Fig. 389. — Truck de manœuvre (ateliers d'Œrlikon).

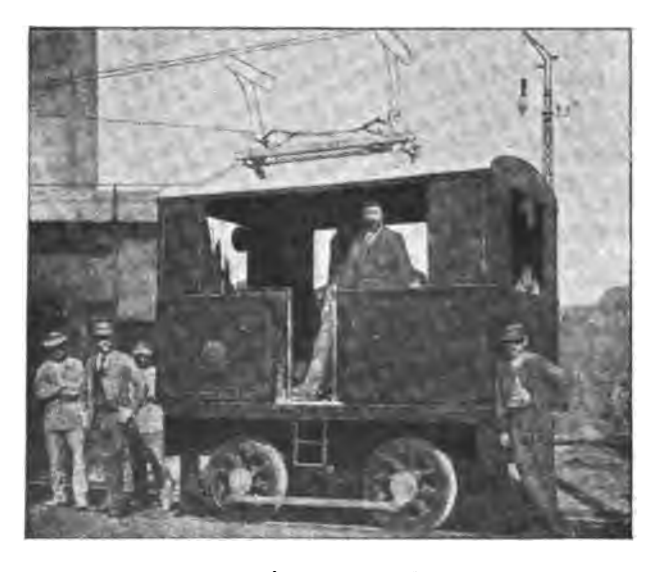


Fig. 390. — Locomotive de manœuvre de la Société Alsacienne.

le service d'ateliers. Le courant est pris par un archet, à l'exclusion

du frotteur, le 3e rail ayant été éliminé, par mesure de sécurité, dans le cas considéré.

La figure 390 montre égalememt une locomotive à archet et à un seul moteur de la *Société Alsacienne de constructions mécaniques*. Mais, pour profiter de l'adhérence totale de la machine, on accouple les deux roues par une bielle. Le poids de la locomotive est de 7 500 kilogrammes [1].

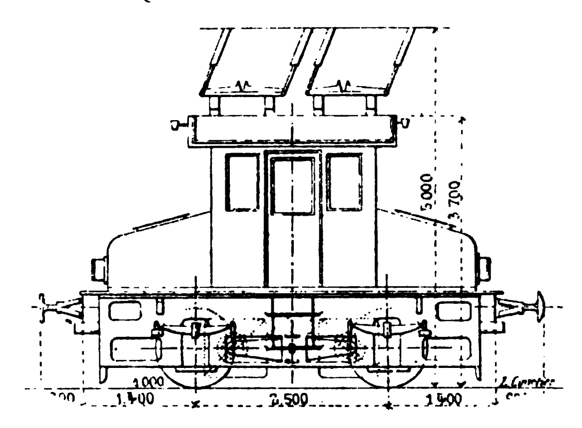


Fig. 391. — Locomotive de manœuvre de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.

Une locomotive analogue, mais plus puissante est représentée par la figure 391. Elle a été combinée par l'*Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft*, de Berlin, spécialement pour le service des gares de marchandises et des dépôts. Dans des installations de cette nature, l'avantage des conducteurs aériens sur le 3e rail est également évident et la consommation de courant n'est pas telle, d'ailleurs, que l'archet ou le trolley ne puisse convenir.

La locomotive est à deux essieux moteurs. Les moteurs ont une puissance de 150 chevaux et la transmission a lieu par engrenages, avec simple réduction et rapport des vitesses de 3 à 1.

[1] Les locomotives à l'Exposition, par Hospitalier et Montpellier.

Locomotives pour trains légers. — L'emploi de locomotives électriques, pour remorquer des trains légers, ne peut se justifier que par des considérations locales. Dans des circonstances analogues, c'est aux automotrices électriques qu'il faudra alors avoir recours, celles-ci ayant le grand avantage, tout en donnant

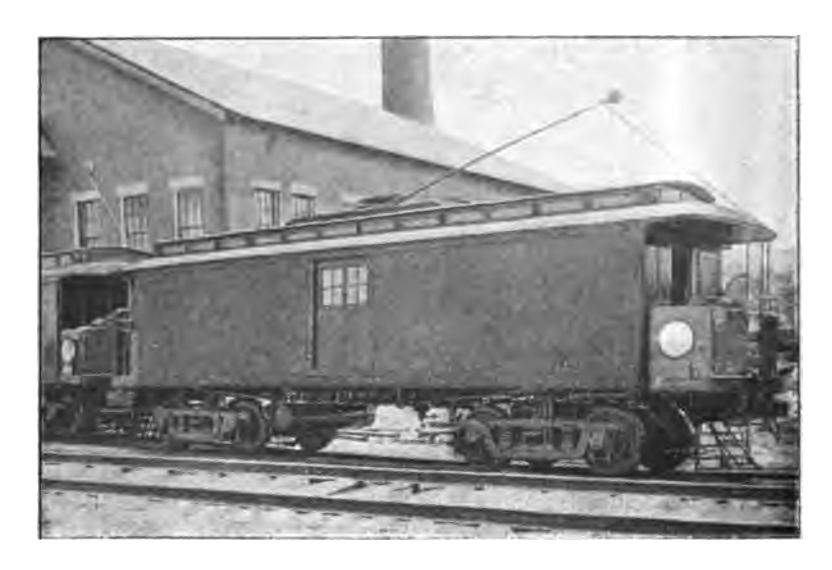


Fig. 392. — Fourgon automoteur de la ligne de Nantasket-Beach.

pour le cas envisagé une puissance suffisante, de diminuer notablement le poids mort.

Sur certaines lignes, afin justement d'éviter ce dernier inconvénient, on a fait de la locomotive un fourgon à bagages.

Les locomotives sont, dans ce cas, constituées très simplement, se conposant d'un truck à marchandises, équipé comme une automotrice, avec cabine de wattman à l'avant et à l'arrière.

La prise de courant se fera plutôt par trolley ou par archet, étant donné que l'on suppose un service ne nécessitant que des efforts de traction peu considérables.

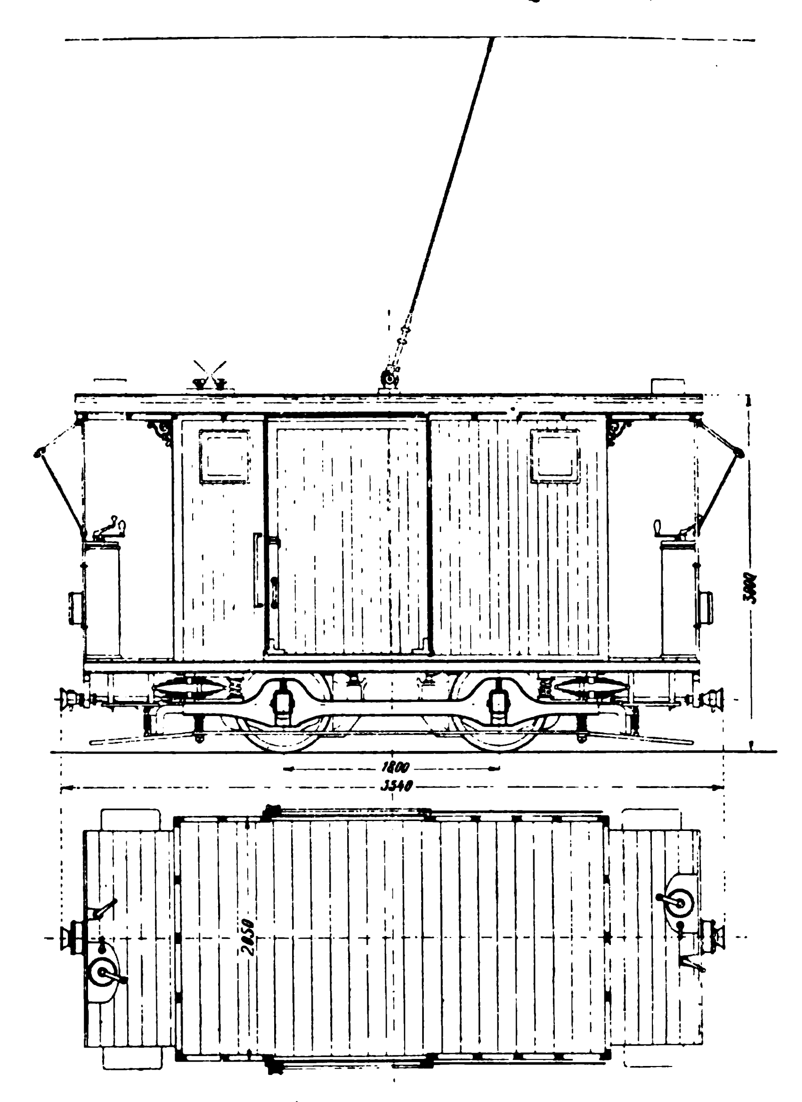


Fig. 393. — Fourgon automoteur Œrlikon.

Les figures 392, 393 et 394 montrent suffisamment comment sont constitués de tels fourgons automoteurs.

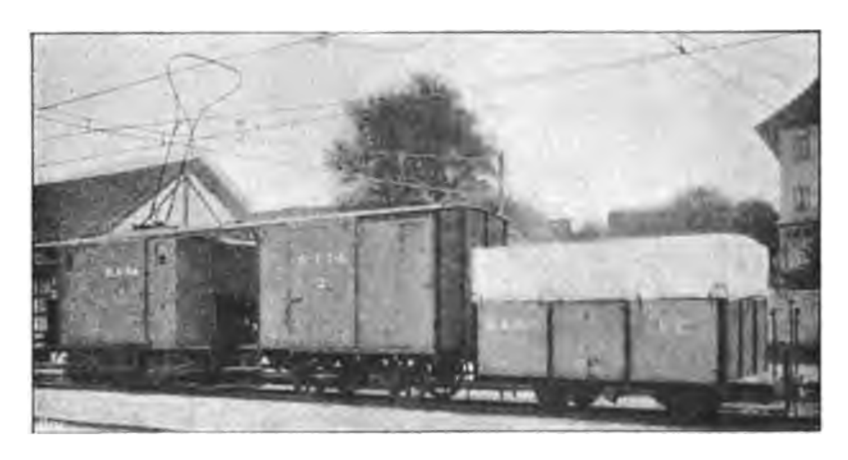


Fig. 394. — Fourgon automoteur avec prise de courant par archet.

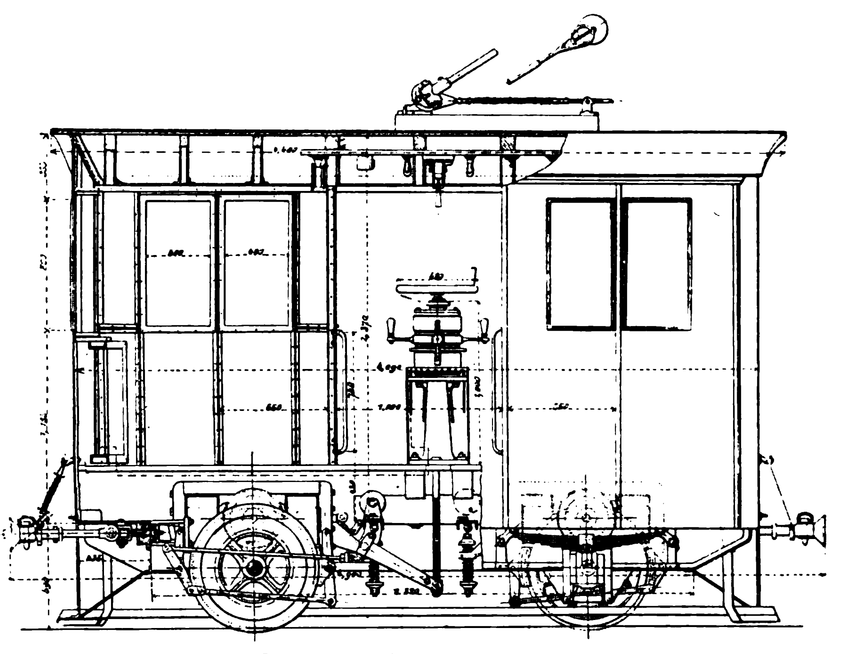


Fig. 395. — Locomotive du chemin de fer de Mürren.

Nous nous bornerons à citer, comme rentrant dans la catégorie

des locomotives légères, celles que les ateliers d'Œrlikon ont construites, en 1891, pour la ligne de Mürren (Suisse). Ces locomotives,



Fig. 395 *bis*. — Locomoteur du chemin de fer de Mürren avec sa voiture de remorque.

dont la figure 395 donne une vue d'ensemble, sont à deux essieux,

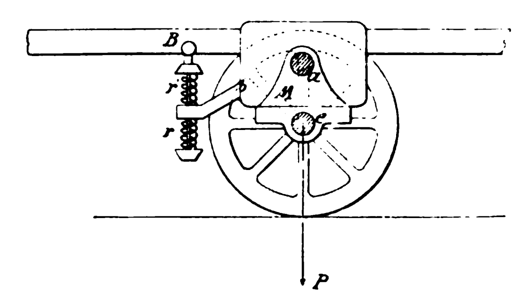


Fig. 396. — Mode de suspension du moteur.

munis chacun d'un moteur de 30 chevaux. Ceux-ci sont placés au-dessus des essieux et ils les attaquent par un jeu d'engrenages

à simple réduction. Le mode de suspension des moteurs est indiqué par la figure 396. Le poids de la locomotive est de 7 200 kilogrammes et l'effort de traction atteint 2 000 kilo-

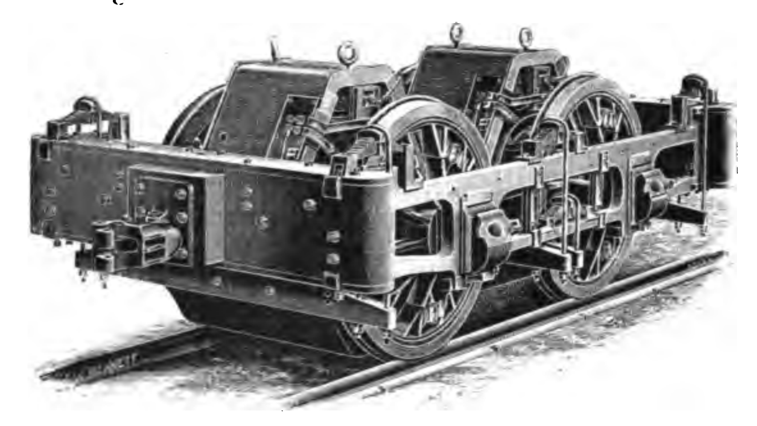


Fig. 397. — Truck de la locomotive de Baltimore.

grammes. La prise de courant se fait par trolley. Le tracé de la ligne présente une rampe continue, vers Mürren, de 50 millimètres par mètre. Aussi la locomotive ne remorque-t-elle qu'une seule voiture (fig. 397).

Locomotives pour trains lourds. — Ces locomotives, devant exercer un effort de traction considérable, se font généralement à quatre essieux et à quatre moteurs. Elles comportent soit deux trucks articulés, soit deux trucks à bogies.

Dans l'un et l'autre cas il est nécessaire que les trucks soient extrêmement résistants, afin de pouvoir supporter sans déformation, les efforts intenses que produisent les moteurs au moment du démarrage.

a) *Locomotives américaines*. — Une des plus célèbres locomotives de ce système est celle de Baltimore (Baltimore and Ohio C°), qui comporte deux trucks articulés analogues à celui que repré-

sente la figure 397. Sur ces trucks reposent le châssis et la caisse qui reproduisent les dispositions générales déjà indiquées, savoir :



Fig. 398. — Locomotive de Baltimore.

au centre la cabine de manœuvre et, de chaque côté, les compartiments des résistances (fig. 398).

Les moteurs ont une puissance de 300 chevaux et, en raison de leurs grandes dimensions, ils ne sont plus à quatre pôles, mais à six pôles (fig. 399). L'induit est monté sur un arbre creux concentrique à l'essieu et qui attaque les roues par cinq croisillons munis de saillie en acier, buttant contre les raies des roues et qui exercent sur celles-ci la pression que leur communique le mouvement de l'induit par l'intermédiaire de tampons en caoutchouc. L'alimentation électrique est assurée par des conducteurs aériens à l'aide d'une prise de courant par navette. Nous avons précédemment expliqué en détail, cette disposition (page 197).

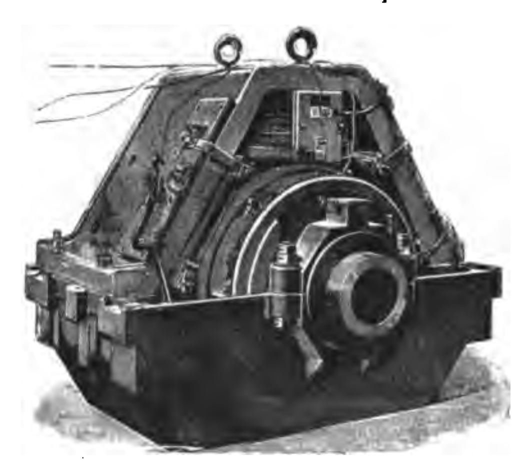


Fig. 399. — Moteur de la locomotive de Baltimore.

La locomotive a une longueur totale de 13 mètres. Les roues d'un diamètre de 1,575 m. sont espacées dans chaque bogie de 2,08 m. Le poids total de la machine est de 90 tonnes. L'effort de traction normal est, en totalité, de 18000 kilogrammes, à la jante des roues; mais il peut s'élever à 27000 kilogrammes. La machine remorque aisément un train de 1 900 tonnes sur une rampe de 1,5 p. 100.

Un type analogue, mais moins puissant, a été combiné par la General Electric C° pour le chemin de fer Buffalo-Lockport (fig. 400 et 401). La locomotive qui y est employée ne comporte plus que quatre moteurs de 155 chevaux. Le poids de la machine est de 38 tonnes seulement.

Il est à noter que la transmission du mouvement ne se fait pas dans cette locomotive par attaque directe des roues, mais

par engrenages, avec simple réduction. Nous avons déjà dit que les moteurs *Gearless*, bien que d'un emploi séduisant, ne se trouvaient pas toujours justifiés, les moteurs électriques tournant



Fig. 400. — Locomotive de Lockport, General Electric Company (vue d'ensemble).

généralement trop vite pour permettre l'attaque directe des essieux. En sorte que, pour des locomotives de puissance normale, la transmission par engrenages peut souvent être plus avantageuse que le montage direct des induits sur les essieux.

b) *Locomotives de la Cie du Chemin de fer d'Orléans.* — C'est également une transmission par engrenages que la Cie Thomson-Houston a adoptée pour l'équipement électrique des locomotives qui font le service de la traction entre la gare du quai d'Orsay

(Paris) et l'ancienne gare de la Cie d'Orléans (fig. 402 et 403). La caisse de cette locomotive repose sur deux bogies à deux essieux par deux pivots[1]. Les longerons des bogies, en tôle d'acier d'une seule pièce, s'appuient, par des ressorts, sur les boîtes à graisse des essieux; ils supportent eux-mêmes, par l'intermédiaire de ressorts, les traverses des pivots, de manière à réaliser une double suspension élastique entre la caisse et les essieux. Un dispositif de rappel spécial assure, en outre, le centrage des bogies dans les courbes.

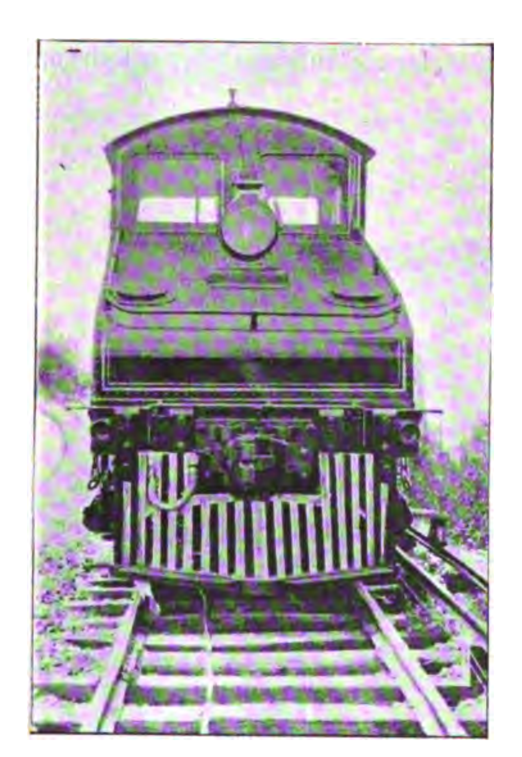


Fig. 401. — Locomotive de Lockport (vue d'ensemble).

Les principales caractéristiques de la locomotive sont les suivantes :

Poids total de la locomotive	45	tonnes.
Longueur totale entre tampons	10,609	mètres.
Largeur	2,918	—
Hauteur au-dessus des rails	3,891	—
Distance entre axes des roues des bogies	2,388	—
Distance entre les centres des deux bogies	4,877	—
Diamètre des roues	1,2115	—
Nombre des roues motrices	8	

Les moteurs ont chacun une puissance de 125 kilowatts, ils sont tétrapolaires avec excitation en série.

[1] *Revue générale des chemins de fer*, novembre 1900.

La prise de courant se fait généralement par frotteur sur 3e rail ; mais, dans la gare du quai d'Orsay, on a installé une distribution par conducteurs aériens et c'est pour cette raison

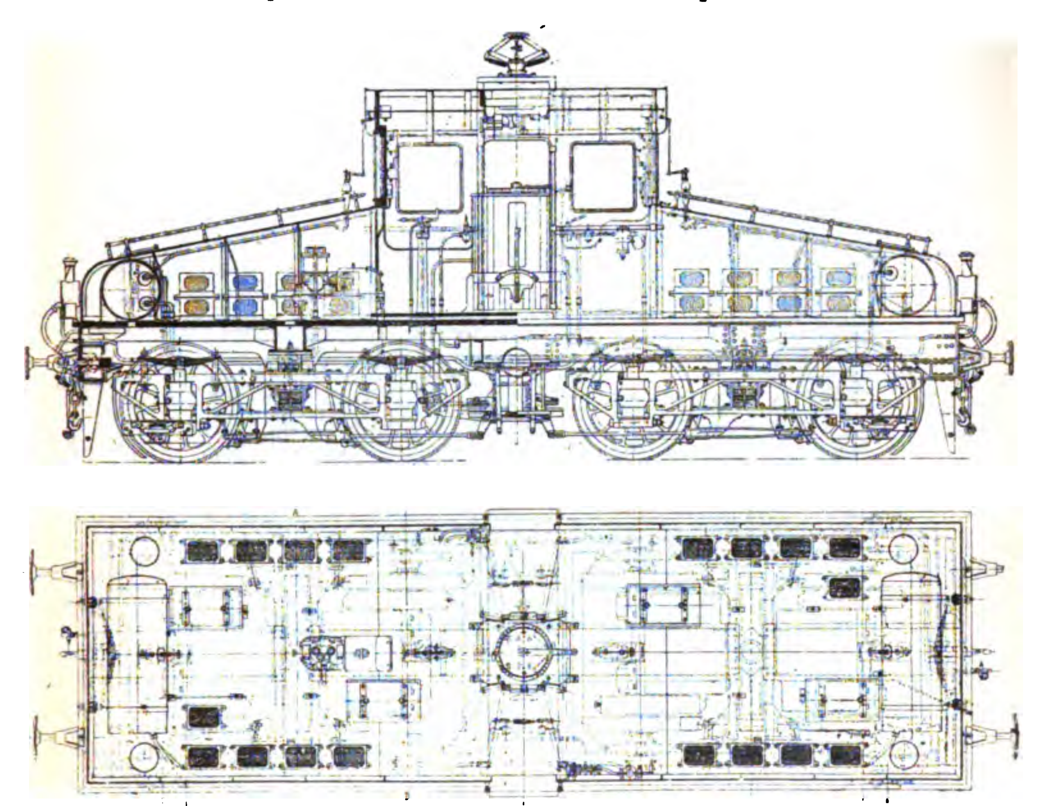


Fig. 402. — Locomotive du chemin de fer de d'Orléans (plan et élévation).

que la locomotive est munie, à son sommet, d'un frotteur avec cadre articulé.

Le groupement des moteurs a lieu par série-parallèle.

La locomotive, dont le fonctionnement est parfait, peut remorquer aisément un train de 300 tonnes (non compris le poids de la locomotive) sur une rampe de 11 millimètres par mètre.

c) *Locomoteurs de la Compagnie des Chemins de fer de l'Ouest.* — La Compagnie des Chemins de fer de l'Ouest a combiné, pour sa nouvelle ligne des Invalides à Versailles, des locomoteurs dont la figure 404 montre le plan et l'élévation [1]. La partie centrale

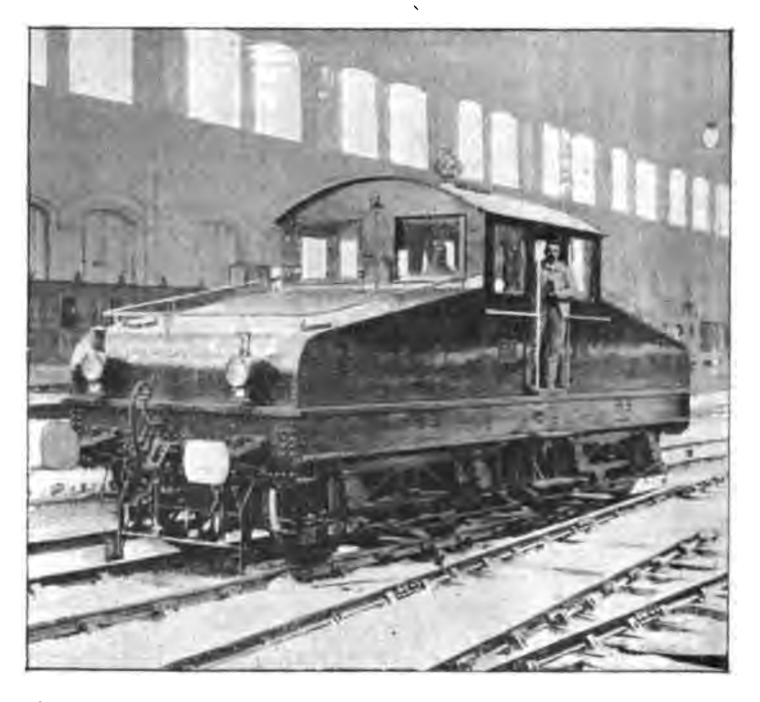


Fig. 403. — Locomotive du Chemin de fer d'Orléans (vue d'ensemble).

de ces locomoteurs sert de fourgon à bagages et pour que la machine puisse marcher dans les deux sens, on a ménagé une cabine de manœuvre, avec contrôleur, aussi bien à l'avant qu'à l'arrière (fig. 405).

Le locomoteur est à bogies et à quatre essieux moteurs. Ses caractéristiques principales sont :

Longueur totale entre tampons	13	mètres.
Distance d'axe en axe des bogies	7	—

[1] *Revue générale des chemins de fer*, août 1902.

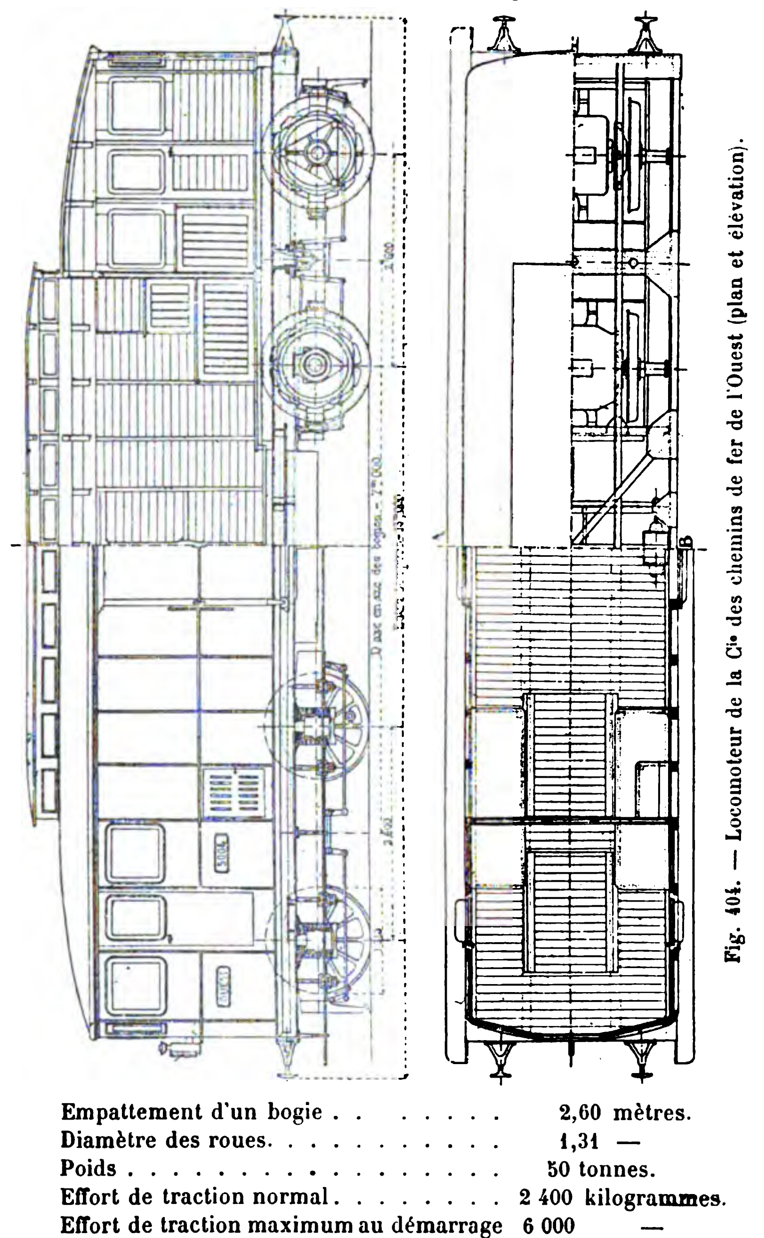


Fig. 404. — Locomoteur de la Cie des chemins de fer de l'Ouest (plan et élévation).

Empattement d'un bogie	2,60 mètres.
Diamètre des roues.	1,31 —
Poids	50 tonnes.
Effort de traction normal	2 400 kilogrammes.
Effort de traction maximum au démarrage	6 000 —

Les moteurs ont une puissance de 125 chevaux. Les induits

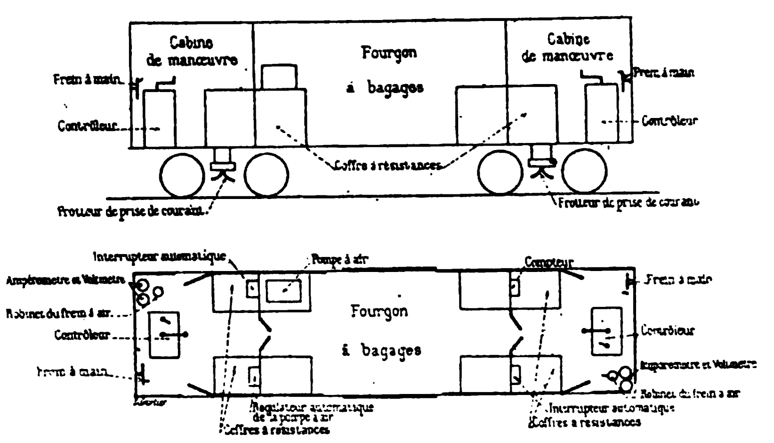


Fig. 405. — Locomoteur de la Cie des chemins de fer de l'ouest (répartition des appareils de manœuvre).

sont montés sur un manchon concentrique à l'essieu. A ses extré-

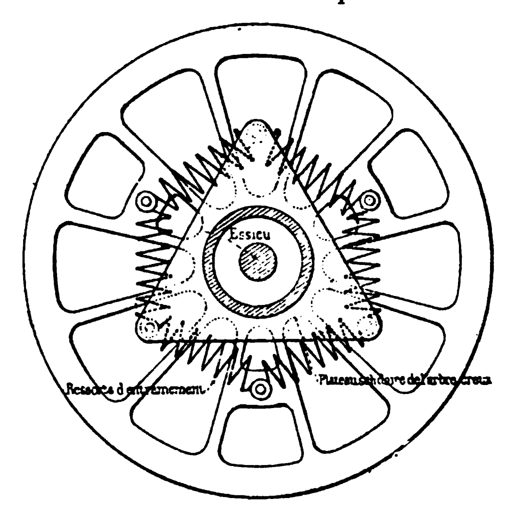


Fig. 406. — Mode d'entraînement des roues.

mités, ce manchon est muni de plateaux triangulaires entraînant les roues par des ressorts (fig. 406). La prise de courant est assurée

par des ailes articulées, pressées par des ressorts sur le 3ᵉ rail.

La manœuvre se fait par couplage série-parallèle, les résistances se trouvant dans des caisses situées dans la cabine du wattman et avec fermeture à volets pour l'aération.

Le locomoteur comporte, indépendamment des appareils usuels de manœuvre, un compresseur d'air, électrique, système Christensen, qui sert pour le freinage.

Locomotives pour métropolitains. — En général les locomotives ne conviennent pas pour la traction des métropolitains, en raison de leur poids mort et de la nécessité où l'on est, pour pouvoir démarrer très rapidement, de réaliser une grande adhérence.

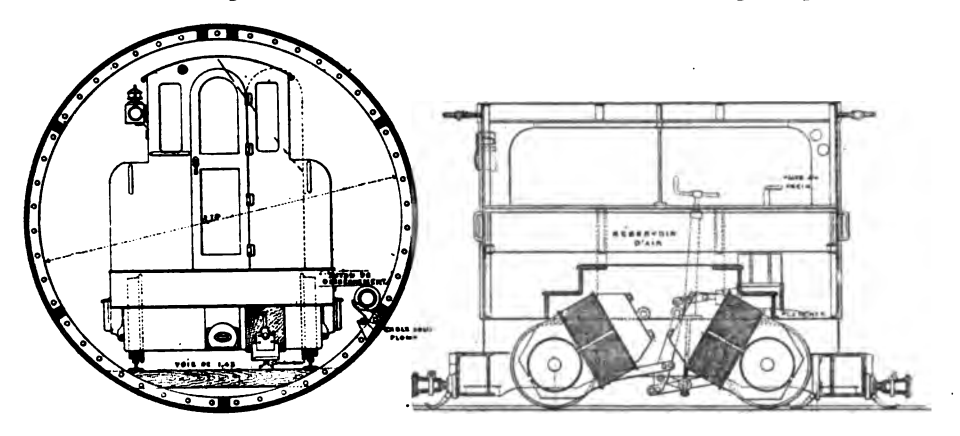


Fig. 407. — Tube du City and South London.

Fig. 408. — Locomotive du City and South London (coupe transversale).

Mais si des raisons spéciales empêchent de recourir à la solution des voitures automotrices, comme par exemple un gabarit trop étroit qui ne permettrait pas de placer les moteurs sous la caisse des voitures on pourra très bien combiner des locomotives capables d'assurer un service aussi chargé que celui d'une ligne métropolitaine.

Sur le *City and South London*, en raison de l'étroitesse du tube

dans lequel circule la ligne (fig. 407), on a adopté une locomotive

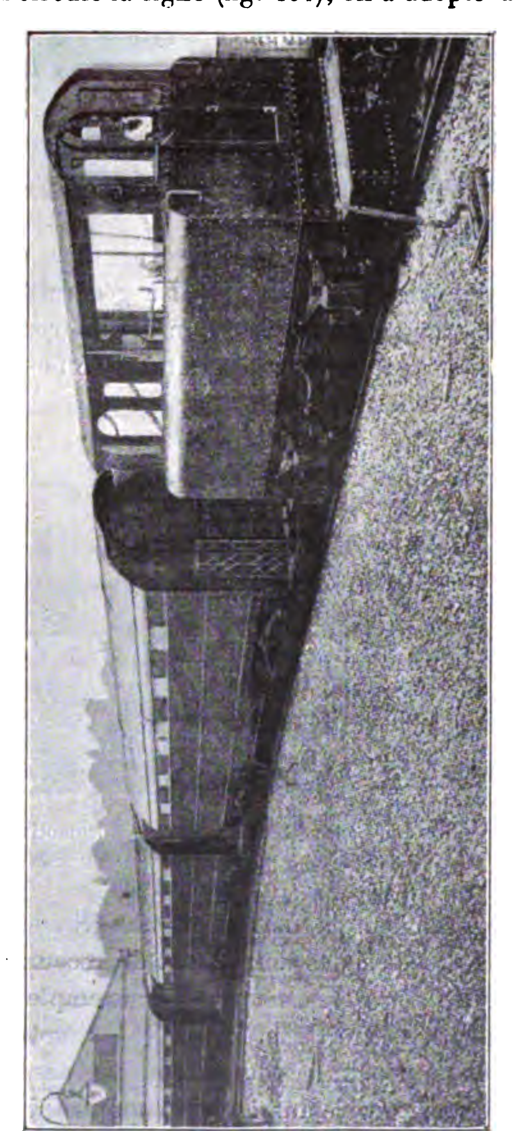


Fig. 409. — Locomotive du City and South London (vue d'ensemble).

à deux moteurs (fig. 408 et 409). Ceux-ci, d'une puissance de

40 à 50 chevaux, ont leurs induits montés directement sur les essieux. Les inducteurs, qui sont bipolaires, sont suspendus par une extrémité au châssis de la voiture et par l'autre ils reposent sur les essieux par l'intermédiaire de coussinets.

Ce sont là des dispositions qui prêtent visiblement à la critique.



Fig. 410. — Locomotive du Central London.

Et étant donné que les trains ne pèsent que 21 tonnes, l'emploi d'automotrices eut été certainement préférable.

Sur le *Central London* qui est également un chemin de fer tubulaire et où, par conséquent, la place fait défaut on a adopté des locomotives très puissantes rappelant beaucoup celle de Baltimore (fig. 410 et 414. Les données principales de ces machines sont les suivantes :

Longueur	9 mètres.
Distance entre axe des roues de chaque truck .	1,75 —
Distance entre les centres des deux trucks. . .	4,50 —
Diamètre des roues	1,066 —
Poids de la locomotive	42 tonnes.
Nombre de moteurs	4
Poids d'un moteur	5 445 kilogrammes
Puissance d'un moteur	200 chevaux.
Effort total de traction au démarrage	6 350 kilogrammes
Effort total de traction à la vitesse de 36 km. . .	3 630 —

Nous avons dit précédemment que la Compagnie exploitante

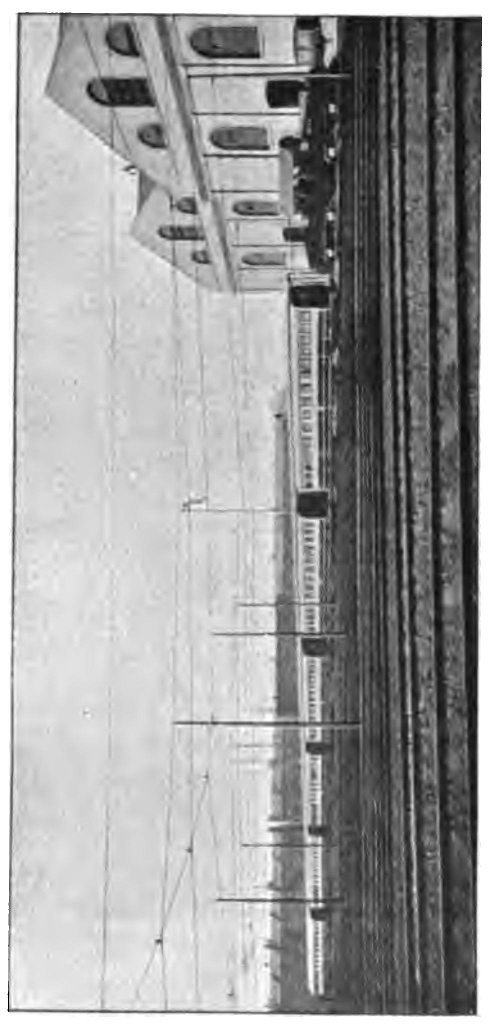


Fig. 411. — Locomotive du Central London, attelée à un train de composition normale.

remplaçait ces locomotives par des voitures automotrices.

Locomotives à courants alternatifs[1]. — Nous avons déjà fait

[1] Nous ne parlons ici que des locomotives pour chemin de fer ordinaire, à adhé-

connaître les divers modes d'emploi des courants alternatifs pour la traction des chemins de fer. En fait, à l'heure actuelle, les courants triphasés à haute et basse tension ont seuls été employés d'une façon suivie dans des exploitations et nous nous bornerons

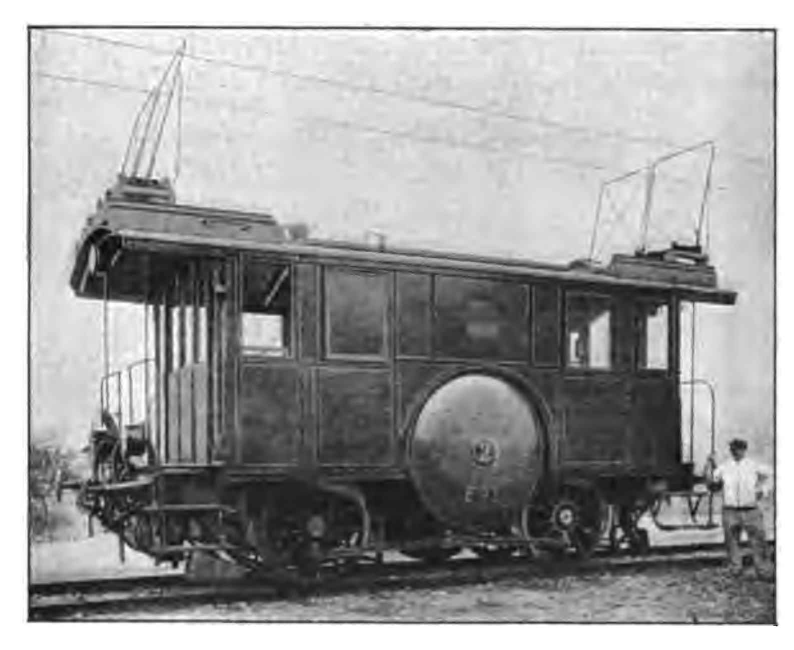


Fig. 412. — Locomotive du chemin de fer de Thoune à Burgdorf (vue d'ensemble).

à faire connaître les types de locomotive qui conviennent à l'un et l'autre cas.

a) *Locomotives à courants triphasés et basse tension* (*Thoune à Burgdorf*). — La locomotive à courants triphasés à basse tension a été appliquée avec un succès complet par la maison Brown-Boveri, sur la ligne de Thoune à Burgdorf. Nous avons expliqué, dans un précédent chapitre, que le courant était distribué, à la

rence. Plus loin nous étudierons quelques types extrêmement intéressants de locomotives à courants triphasés pour voie à crémaillère.

tension de 750 volts, par des conducteurs aériens et que la prise de courant se faisait par un archet. Les figures 413 et 415 donnent des vues d'ensemble d'une locomotive avec et sans la caisse et la figure 414 en représente les dispositions schématiques. Il n'y a que deux essieux, avec une charge de 15 tonnes par essieu. Le châssis est semblable à celui d'une locomotive à vapeur. Les moteurs, au nombre de deux, ont chacun une puissance de 150 chevaux. Ils

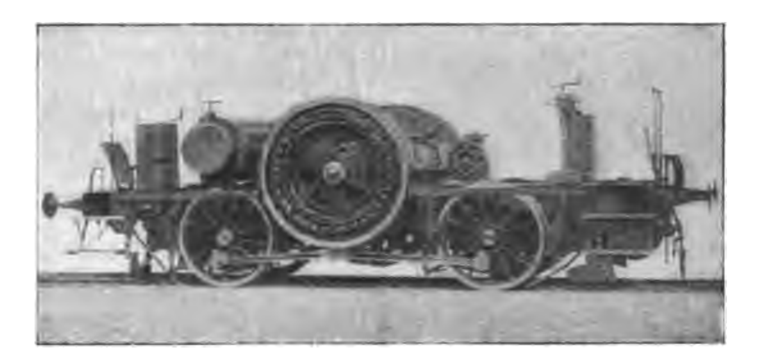


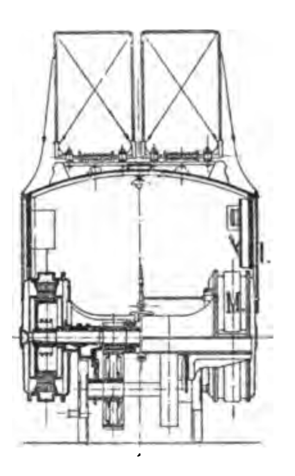
Fig. 413. — Locomotive sans sa caisse.

sont montés aux deux extrémités d'un même arbre, qui tourne dans de forts paliers boulonnés sur le châssis, en son milieu. Ces paliers sont particulièrement longs et forts parce que le *rotor* des moteurs se trouve en porte-à-faux. Le *stator* est boulonné sur le châssis. Grâce aux dispositions prises on peut très facilement enlever soit le rotor, soit le stator.

L'arbre de rotation est muni de deux roues dentées pouvant engréner avec des roues dentées, calées sur un arbre de renvoi intermédiaire, qui actionne les roues par des bielles.

Ces deux systèmes d'engrenages permettent d'obtenir soit une vitesse de 36 kilomètres à l'heure, soit une vitesse très réduite.

Les résistances de démarrage sont communes aux deux moteurs. Elles sont mises successivement hors circuit par la simple rotation du contrôleur, grâce à une transmission par chaînes iden-



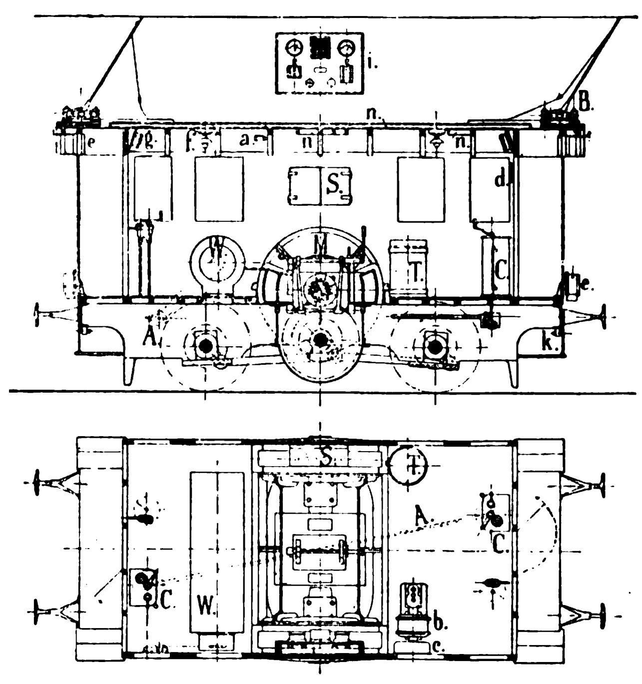


Fig. 414. — Plan, élévation et coupe transversale de la locomotive du chemin de fer de Thoune à Burgdorf.

tique à celle que nous avons décrite, en parlant des automotrices de la même ligne.

La prise de courant se fait, comme il a déjà été dit, par quatre archets.

La locomotive comporte, indépendamment des appareils ordinaires de manœuvre, un transformateur abaissant la tension de 750 à 100 volts, en vue de l'alimentation d'un compresseur électrique de 4 chevaux. Elle est également munie d'un frein à main.

Les principales données des locomotives sont, d'autre part, résumées comme il suit :

Nombre des essieux	2
Distance des essieux.	3,14 mètres.
Longueur entre tampons.	7,8 —
Nombre des moteurs	2
Puissance par moteur	150 chevaux.
Tension aux bornes des moteurs	750 volts.
Nombre de tours, par minute, des moteurs . .	300
Rapport de réduction des engrenages.	$\frac{1}{1,88}$ et $\frac{1}{3,72}$.
Diamètre des roues motrices.	1,230 mètre.
Tare totale	30 tonnes.
Poids de l'équipement électrique.	10 —
Poids d'un moteur.	4 000 kilogrammes.
Vitesse à l'heure, en kilomètres.	18 ou 36 km.

b) *Locomotives à courants triphasés et haute tension* (*chemin de fer de la Valteline*). — L'emploi direct des courants triphasés à haute tension a été fait sur la ligne de la Valteline par MM. Ganz et C[ie], de Budapest. Le courant est distribué par deux lignes aériennes à 3000 volts. Pour les trains de marchandises la traction est faite par des locomotives, comportant deux trucks articulés sur lesquels repose la cabine du conducteur-électricien (fig. 415 et 416). Chaque truck est à deux essieux et sur chacun des essieux est monté directement un moteur. Le *stator*, seul, de ces moteurs reçoit du courant à 3 000 volts; le *rotor* n'est traversé que par des courants induits dont la tension ne dépasse pas

300 volts. Ce sont ces courants qui sont envoyés, par trois bagues, dans les résistances de démarrage[1]. Celles-ci sont des *résistances liquides*. Des lames de plomb plongeant plus ou moins dans une dissolution de carbonate de soude en constituent les éléments. La variation de résistance s'obtient très commodément et par gradations insensibles, en repoussant plus ou moins la dissolution dans le bas des résistances, à l'aide de l'air comprimé servant à

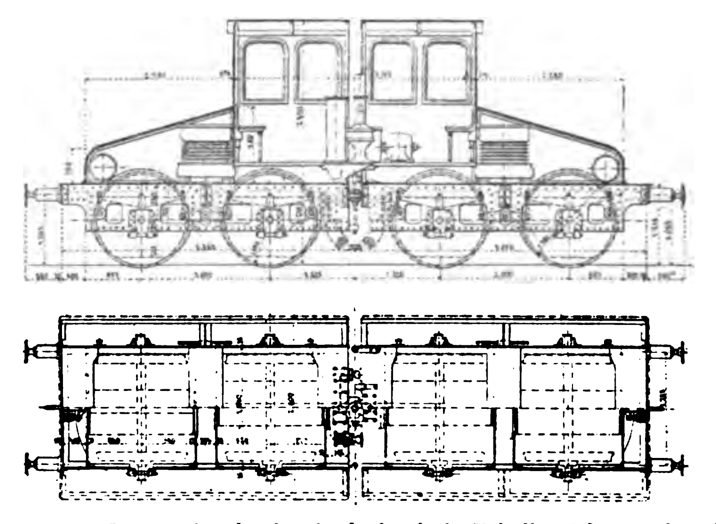


Fig. 415. — Locomotive du chemin de fer de la Valteline (plan et élévation).

actionner les freins. Ces résistances liquides sont placées en avant et en arrière du châssis[2].

Dans la cabine se trouve le compresseur. Il est actionné par un moteur triphasé à 100 volts, alimenté par un transformateur statique de 8 kilowatts, abaissant la tension de 3 000 à 108 volts. Le même transformateur sert pour l'éclairage.

Le trolley, véritable interrupteur, se lève ou s'abaisse par l'air comprimé.

[1] On voit que l'on n'effectue pas, comme pour les automotrices de la même ligne dont il a déjà été parlé, le groupement des moteurs en cascade.

[2] *Bulletin des électriciens*, mars 1893. Communication de M. Korda.

La locomotive a une puissance de 600 chevaux et peut réaliser une vitesse de 30 kilomètres à l'heure, avec 450 tonnes. Son poids est de 47 tonnes.

Ce sont également MM. Ganz et Cie qui ont construit la locomotive à 3 000 volts, 42 périodes qui fait le service des marchandises entre les ateliers impériaux de Völlersdorf et la gare de Schnee-

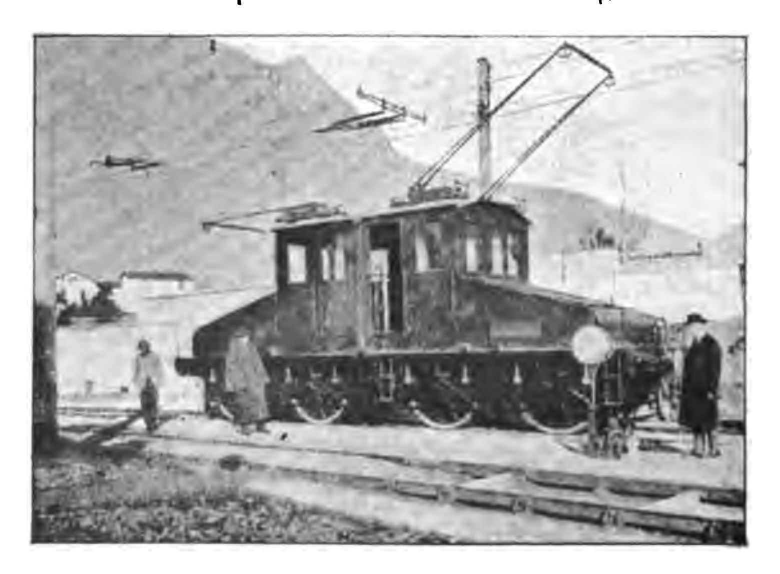


Fig. 416. — Locomotive du chemin de fer de la Valteline (vue d'ensemble).

berg. La locomotive n'est munie que d'un seul moteur de 50 chevaux, tournant à 600 tours par minute et attaquant l'un des essieux par un jeu d'engrenages. Comme pour les locomotives de la Valteline, le démarrage et le réglage de la vitesse s'obtiennent par insertion de résistances sur le circuit du rotor. Et, pour cet objet, il est également fait usage de rhéostats liquides, manœuvrables par l'air comprimé.

Locomotives à grande vitesse et haute tension. — Comme rentrant dans cette catégorie, nous signalerons la locomotive qui a

été expérimentée par la maison Siemens et Halske, sur la ligne d'essai de Berlin à Zossen. Bien qu'il ne s'agisse pas là d'une exploitation régulière, il n'est pas inutile de dire quelques mots

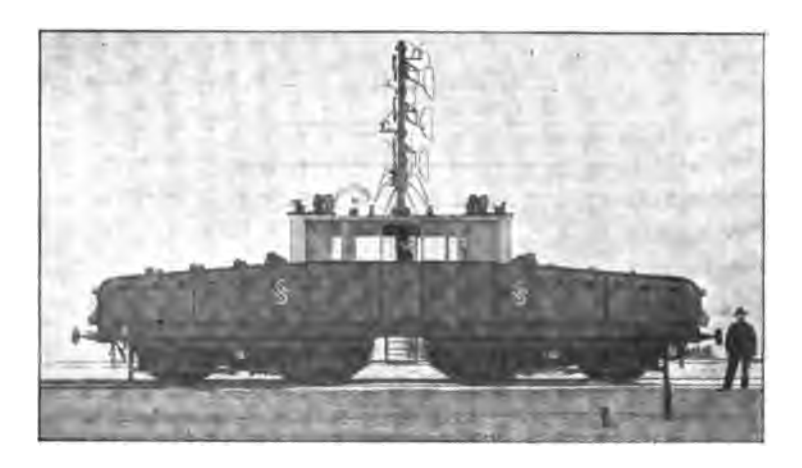


Fig. 417. — Locomotive à grande vitesse Siemens et Halske (vue d'ensemble).

de cette machine, pour bien montrer l'étendue du champ d'action que la traction électrique a encore devant elle.

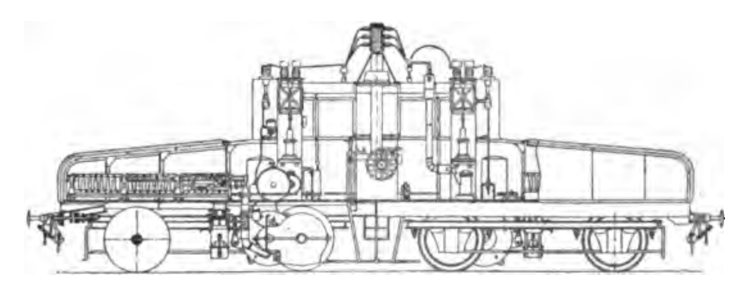


Fig. 418. — Locomotive à grande vitesse Siemens et Halske (coupe longitudinale).

L'électricité est distribuée par une ligne triphasée à 10 000 volts et arrive à la locomotive par un triple archet.

La forme générale de la locomotive est celle d'une locomotive à courant continu, mais avec plus d'allongement (fig. 417 et 418).

Chacun des deux bogies est muni de deux moteurs de 400 chevaux attaquant les essieux par engrenages, avec simple réduction.

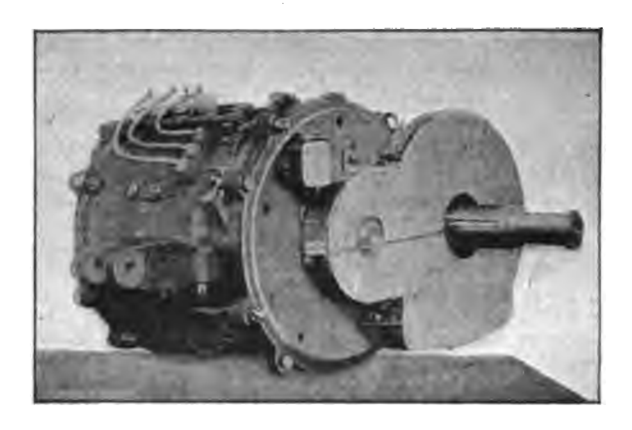


Fig. 419. — Moteur à 10 000 volts.

Comme ces engrenages tournent très vite, on ne peut se contenter d'un graissage par barbotage dans un carter ; on y a substitué un graissage par huile projetée sous pression en plusieurs jets, au point d'attaque des dents, dans le sens du mouvement ; une pompe puise constamment l'huile des carters et la monte dans un réservoir supérieur, sous une pression de 50 millimètres de mercure ; de là, l'huile se rend, par des tubes, dans le carter où elle est dirigée sur les dents dans le sens convenable.



Fig. 420. — Stator du moteur à 10 000 volts.

Les moteurs (fig. 419 et 420) reposent d'une part sur l'essieu des roues, par des paliers montés sur des pattes boulonnées sur le

bâti du moteur, d'autre part sur des pattes suspendues par ressorts au châssis du bogie.

Les coussinets de l'arbre moteur sont en bronze, avec métal antifriction. Ils ont une portée de 300 millimètres et un alésage de 100 millimètres.

Le poids du moteur complet est de 4 090 kilogrammes.

Les résistances de démarrage sont placées sur le châssis aux extrémités de la locomotive.

La manœuvre des moteurs se fait uniquement par insertion de résistances sur les induits des moteurs.

Les essais auxquels il a été procédé ont montré que la locomotive pouvait remorquer aisément, à la vitesse de 105 kilomètres à l'heure, deux voitures pour voyageurs pesant 31 tonnes. D'autre part l'emploi d'une tension triphasée à 10 000 volts a été reconnu comme ne présentant aucune difficulté pratique spéciale, en sorte que les constructeurs considèrent le système qu'ils ont appliqué comme résolvant d'une façon satisfaisante le problème de la traction électrique à grande distance.

CHAPITRE X

CHEMINS DE FER DIVERS A TRACTION ÉLECTRIQUE

Chemins de fer à crémaillère. Crémaillères avec courant continu. Crémaillères avec courants triphasés. Monorails électriques. Monorail Behr-Lartigue. Monorail Langen. Funiculaires électriques. Plates-formes continues à plusieurs vitesses. Plate-forme de l'Exposition de Chicago. Plate-forme de l'Exposition de 1900. Chemins de fer de mines.

Chemins de fer à crémaillère. — Nous avons vu, en étudiant le problème de la traction, qu'à partir d'une certaine rampe il devenait impossible d'assurer le déplacement du matériel par la simple adhérence. Il convient encore de remarquer que la traction électrique permet de reculer notablement cette limite, soit par suite de l'augmentation de poids adhérent qu'elle met en œuvre, soit que, par l'effet même du courant passant des roues dans les rails, il se produise, comme le fait a été vérifié à Baltimore, une augmentation du coefficient d'adhérence.

Les tramways électriques ont démontré clairement l'aptitude du nouveau mode de traction à la circulation des voitures sur de très fortes rampes, et on cite des installations pour lesquelles on a admis des rampes atteignant 10 à 12 millimètres par mètre.

Bien qu'avec des chemins de fer on puisse atteindre des limites aussi élevées, il est généralement reconnu comme excessif de dépasser des rampes de 55 à 60 millimètres. La question de sécurité prend alors le pas sur des questions d'ordre purement électrique et la préoccupation d'assurer rapidement l'arrêt de la voiture, même en cas d'interruption du courant, impose, pour des

rampes dépassant de telles limites, des artifices de traction spéciaux.

La *crémaillère* est un de ceux que l'on emploie alors le plus

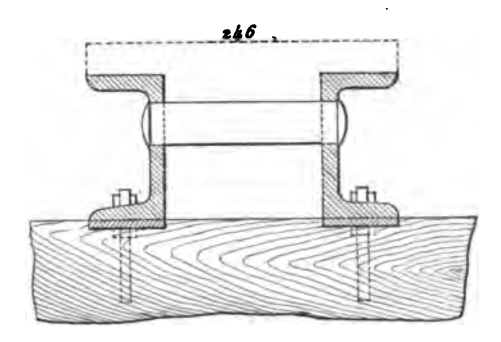


Fig. 421. — Crémaillère Riggenbach (coupe transversale).

volontiers, surtout qu'en cette matière l'ingénieur a, pour le guider, notamment en Suisse, de nombreuses installations de crémaillère à vapeur, devenues aujourd'hui tout à fait classiques.

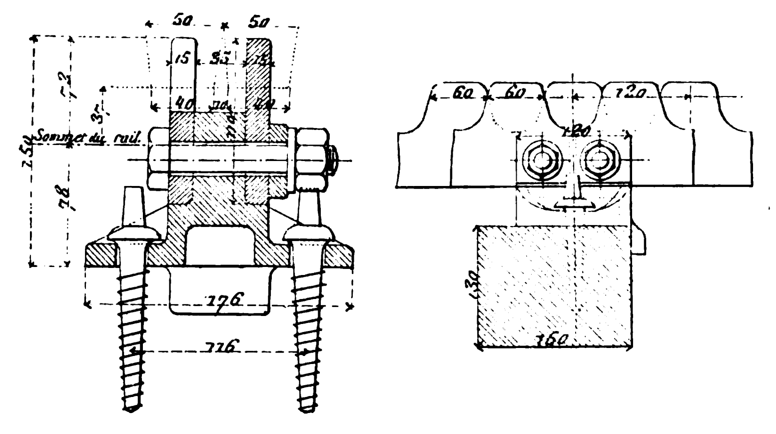


Fig. 422. — Crémaillère Abt (coupe transversale et élévation longitudinale).

Elles ont mis en lumière les avantages précieux de deux types de crémaillère : la crémaillère Riggenbach et la crémaillère Abt.

La première (fig. 421) est en forme d'échelons, ceux-ci étant maintenus par deux joues verticales en acier; la crémaillère Abt, plus simple, et présentant le grand avantage de pouvoir être fabriquée à l'emporte-pièce rappelle l'ancienne crémaillère de cuisine (fig. 422). Elle comporte généralement deux lames parallèles avec dents chevauchant l'une sur l'autre, ce qui adoucit sensiblement le roulement.

Dans l'un et l'autre système, la crémaillère sert de point d'appui à une ou plusieurs roues dentées que met en mouvement une locomotive roulant sur deux rails, situés de part et d'autre de la crémaillère.

Pour appliquer l'électricité à la traction par crémaillère, il suffit de substituer à la locomotive usuelle à roues dentées une roue électrique actionnant, par engrenages, la roue d'engrènement. Quant au courant même, il est évidemment indiqué de le puiser soit sur une ligne aérienne, soit sur un 3e rail.

Il existe des chemins de fer à crémaillère avec courant continu (Salève, Gênes-Granoloro, etc.). Mais, dans ces dernières années, la tendance a été plutôt aux courants triphasés, ce que l'on peut expliquer, en partie, par les considérations suivantes.

La crémaillère est surtout employée dans les pays montagneux où l'on a à effectuer un service généralement intermittent, l'exploitation étant très souvent arrêtée en hiver. D'autre part, il est presque toujours possible d'alimenter la ligne par un transport de force, c'est-à-dire par un système qui comporte un certain abaissement de la tension. Par conséquent, aussi bien pour diminuer l'importance des installations électriques que pour éviter des frais notables de transformation, on aura une tendance naturelle à avoir recours aux courants alternatifs et parmi ceux-ci à ceux qui sont de l'emploi le plus pratique, c'est-à-dire aux courants triphasés.

Il faut remarquer, en outre, que l'ascension d'un train, même de faible poids, sur une ligne à crémaillère comporte un travail très élevé; en sorte que si cette ligne a une longueur telle que

plusieurs trains peuvent circuler en même temps, la consommation de courant, rapportée à l'unité de longueur, est bien plus élevée que pour un chemin de fer ordinaire et il faut, par suite, prévoir un certain nombre de points d'alimentation. Le courant triphasé permet de réaliser très facilement cette alimentation multiple, chaque centre d'alimentation ne nécessitant que des transformateurs statiques.

Enfin la question du freinage électrique et de la récupération, déjà importante pour un chemin de fer ordinaire, passe, avec la crémaillère, au premier plan. Et l'on sait avec quelle facilité le freinage et la récupération peuvent être obtenus dans le cas des courants triphasés.

A la vérité, en employant des moteurs shunt on se trouverait à ce double point de vue, dans une situation assez favorable. Mais un moteur à courant triphasé coûte moins cher et est surtout d'un entretien moins dispendieux qu'un moteur shunt.

Et si, dans une installation à démarrages fréquents, on doit accepter les inconvénients des moteurs à courants continus, en raison des avantages incontestables qu'ils présentent pour ces démarrages, on se trouve, dans le cas de la crémaillère, en présence d'un régime différent, le démarrage étant l'exception et l'allure générale comportant, au contraire, une circulation à vitesse constante. Or, ce sont là des conditions éminemment favorables à l'application des moteurs à courants triphasés.

Une ligne de chemin de fer peut ne présenter un profil anormal que sur une partie de sa longueur. Dans ce cas on aura évidemment intérêt à limiter l'emploi de la crémaillère à la section spéciale et l'on combinera à la fois l'adhérence avec la crémaillère soit en ayant des locomotives mixtes, soit en poussant les trains ordinaires sur la partie à crémaillère par une locomotive ne circulant que dans cette section.

Crémaillères avec courant continu. — Le chemin de fer élec-

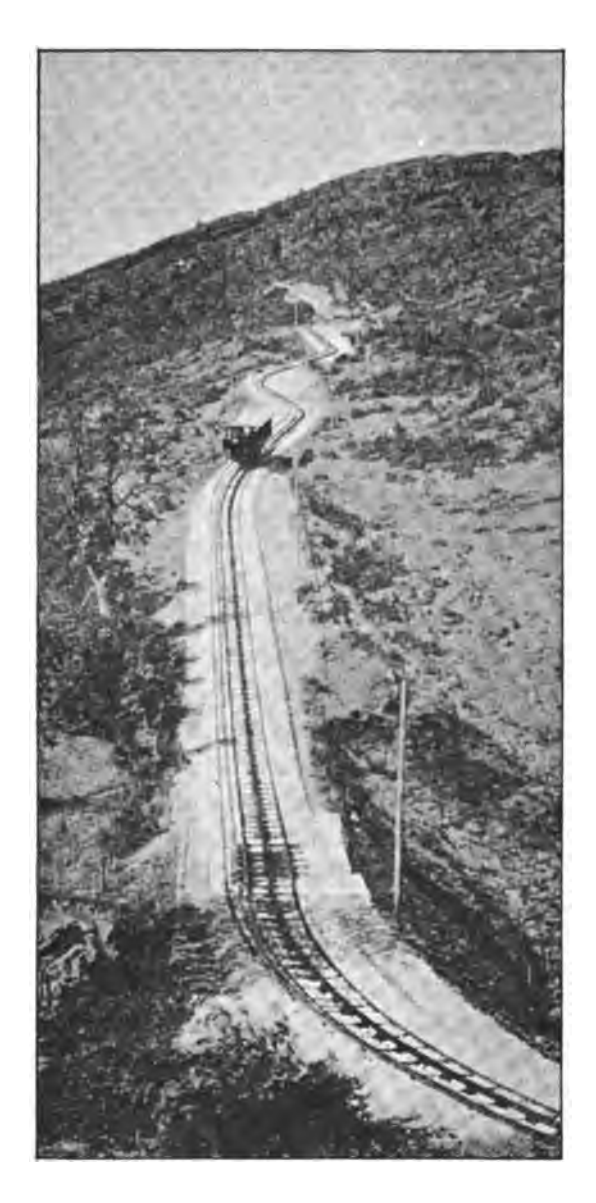


Fig. 423. — Chemin de fer à crémaillère du mont Salève.

trique du mont Salève est un exemple classique de ce système (fig. 423 et 424).

La voie qui présente en certains points des rampes de 25 milli-



Fig. 424. — Chemin de fer du Salève (Vue de la crémaillère et du rail conducteur).

mètres par mètre est à l'écartement d'un mètre. Entre les deux rails court une double crémaillère Abt prenant appui, comme les rails, sur une traverse métallique (fig. 425). La même traverse

porte à son extrémité l'isolateur formant support du 3ᵉ rail. La prise de courant se fait par des frotteurs en bronze et le courant revient à l'usine par les rails et des feeders de retour.

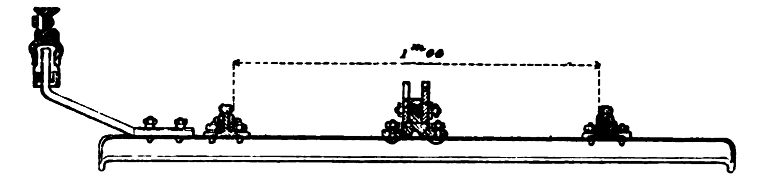


Fig. 425. — Coupe transversale de la voie.

La distribution est effectuée à 560 volts (600 volts à l'usine).

Les voitures automotrices (fig. 426 et 427) sont à trois essieux. Deux moteurs-série de 40 chevaux, placés sous la caisse, de par

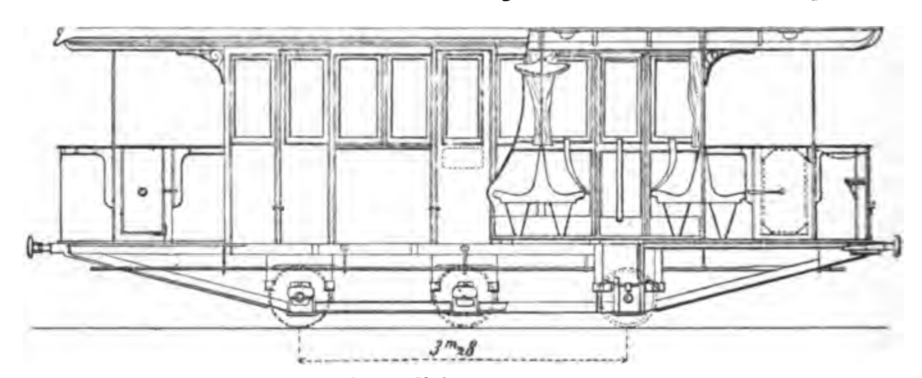


Fig. 426. — Voiture automotrice.

et d'autre de l'essieu central, attaquent la crémaillère par un double engrenage réducteur (rapport 13 à 1) (fig. 428). La vitesse des voitures varie de 1,50 m. à 3 mètres. Le réglage de la vitesse et le démarrage s'obtiennent par l'intercalation des résistances sur les circuits des moteurs, mais sans que l'on réalise le couplage par série-parallèle.

La question du freinage a, dans le cas actuel, une grande impor-

tance; mais on doit remarquer que la crémaillère constitue par elle-même un frein excellent, si l'on s'arrange pour bloquer les arbres moteurs. On peut, sur le chemin de fer du mont Salève,



Fig. 427. — Voiture automotrice descendant la crémaillère.

obtenir ce bloquage par un système de màchoires s'appliquant sur des poulies à gorge, montées sur l'arbre moteur (fig. 429). En

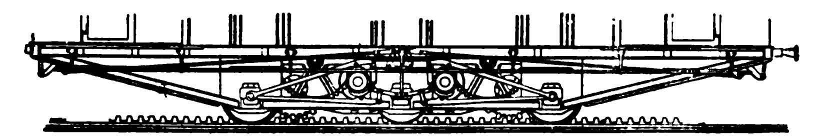


Fig. 428. — Moteur et mode d'attaque de la crémaillère.

même temps, pour éviter un échauffement excessif, on arrose les poulies avec de l'eau.

Les moteurs eux-mêmes peuvent également servir de frein quand on les fait travailler sur les résistances de démarrage. Enfin par la marche arrière on dispose d'un système de freinage énergique, mais très brutal.

Lorsque la ligne est mixte et doit être exploitée à la fois par crémaillère et par adhérence on peut soit prendre les moteurs ordinaires pour actionner la roue engrénant avec la crémaillère, soit monter sur la voiture un moteur spécial qui n'intervient que sur la section à crémaillère.

La première solution oblige à des transmissions un peu compliquées. En outre, comme nous l'avons fait remarquer, le moteur-série, excellent pour les parties à adhérence, n'est pas très convenable pour la traction par crémaillère. Mais si la section à

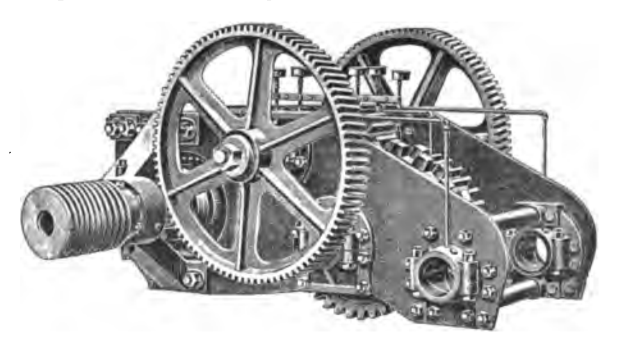


Fig. 429. — Poulie à gorges pour le freinage.

crémaillère est courte, il n'y aura plus un grand intérêt à modifier le système d'excitation. En sorte que, dans le cas de la traction mixte, le choix du moteur est surtout une question d'espèce.

Sur le *chemin de fer électrique de Laon* (fig. 430), qui n'a que 1 479 mètres de longueur, dont 754 mètres en crémaillère, on a adopté une voiture ordinaire de tramway à trolley, munie de 2 moteurs, de 45 chevaux, à excitation série (fig. 531). Ceux-ci attaquent les essieux par engrenages et font mouvoir, en même temps qu'eux, une roue dentée sur laquelle passe une chaîne galle actionnant un arbre intermédiaire, placé sous le milieu de la voiture (fig. 432). C'est sur cet arbre que l'on a monté la roue dentée à double disque actionnant la crémaillère. Celle-ci est d'ailleurs du système Abt, à double lame et dents chevauchées.

La rampe la plus forte à franchir atteint 0,129 m. par mètre.

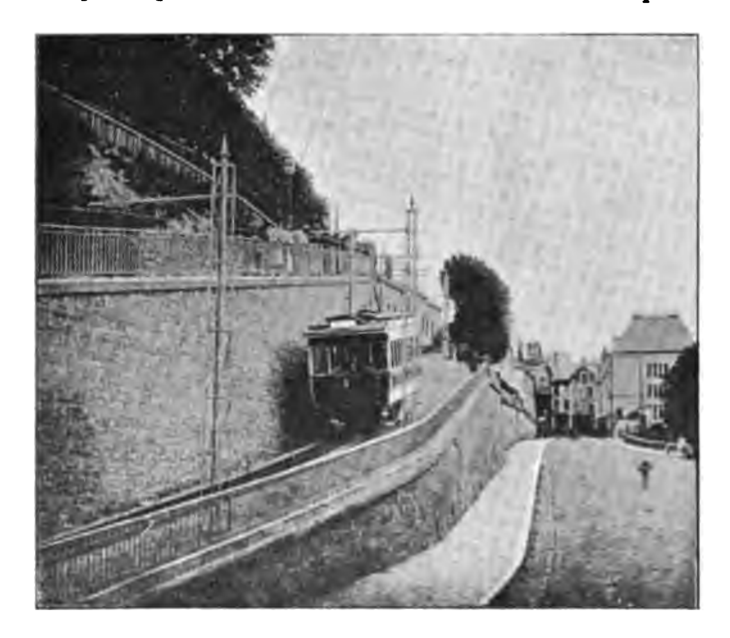


Fig. 430. — Chemin de fer de Laon (section à crémaillère).

On est donc à la limite de l'adhérence. Aussi a-t-on cherché,

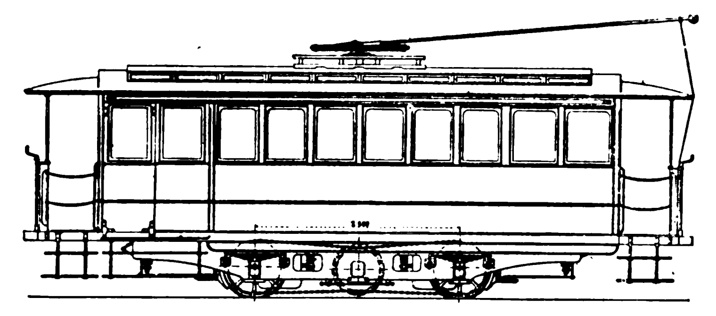


Fig. 431. — Voiture automotrice du chemin de fer de Laon.

principalement pour éviter les pertes occasionnées par la transmission, à marcher sans crémaillère, tout en conservant celle-ci

comme moyen de freinage. Les essais, conduits par la Cie Thom-

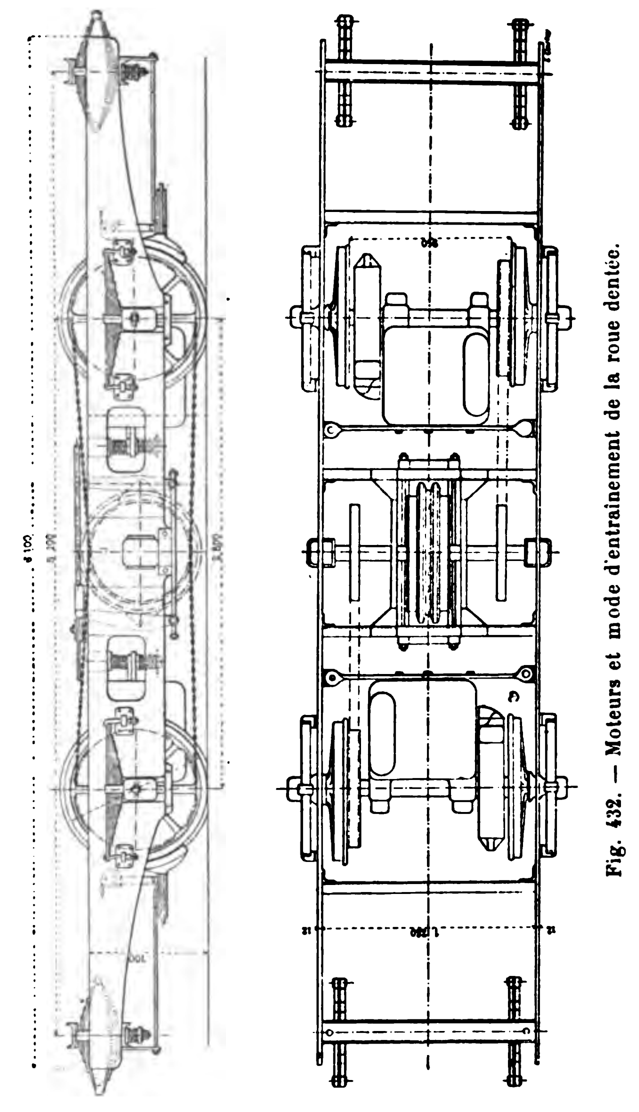


Fig. 432. — Moteurs et mode d'entraînement de la roue dentée.

son-Houston, furent, à ce point de vue, satisfaisants, et comme l'explique M. Bourquelot, ingénieur des ponts et chaussées, dans

la *Revue Générale des Chemins de fer*, on a pu supprimer, à la montée, toute intervention de la crémaillère [1].

Cette expérience est intéressante, en ce sens qu'elle montre avec quelle facilité les moteurs et les voitures électriques se prêtent à la traction sur rampes accentuées. Mais il ne faut pas oublier qu'il s'agit d'une petite exploitation locale, avec voiture unique tout à fait comparable, quant à ses dimensions et à son poids, à une voiture de tramway.

Pour se servir de la crémaillère comme frein, on met en action quatre sabots qui viennent s'appliquer sur des poulies montées sur l'arbre intermédiaire. Ce système de freinage donne une sécurité absolue. On a en outre démontré que l'on pouvait très facilement arrêter les voitures à la descente, soit par la marche arrière, soit en coupant le courant et en mettant les moteurs en court circuit l'un sur l'autre.

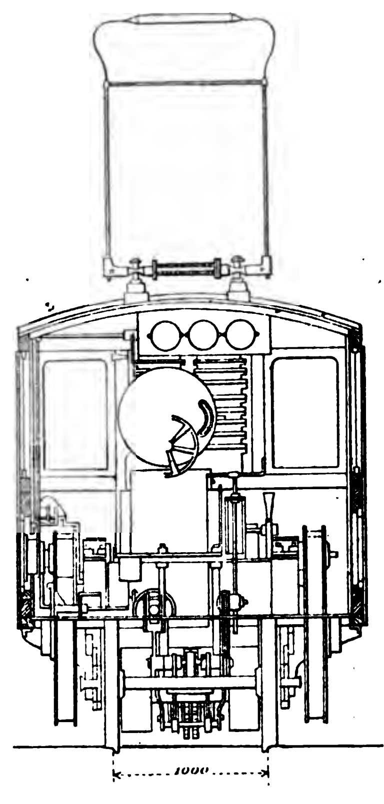


Fig. 433. — Locomotive du chemin de fer de Lyon-Saint-Just.

Sur le *chemin de fer électrique Lyon-Saint-Just*. MM. Brown-Boveri ont réalisé une très intéressante application des moteurs à excitation en dérivation, combinés avec des moteurs-série pour la marche par simple adhérence. La rampe à franchir atteint 19 p. 100

[1] La rampe de 0,129 m. franchie par simple adhérence est en courbe de 120 m. de rayon. Les voitures y réalisent une vitesse de 12 kilomètres à l'heure. A ce moment les moteurs sont en parallèle. Ils consomment de 160 à 180 ampères sous 500 volts ; soit une puissance de 80 à 90 kilowatts.

La locomotive employée à cet effet comporte d'abord 2 moteurs-série de 25 chevaux attaquant les essieux par engrenages à simple réduction, puis un fort moteur shunt de 150 chevaux attaquant la crémaillère Abt par deux roues dentées avec double train d'engrenages. Le courant arrive à la locomotive par un double archet prenant contact avec une ligne aérienne à 500 volts. L'exploitation courante faite avec ce type de locomotive a démontré clairement les avantages du moteur shunt au point de vue de la récupération. C'est ainsi que l'on peut, à la descente, sur la section à crémaillère de Lyon-Saint-Just régénérer 60 p. 100 de l'énergie consommée à la montée.

Crémaillères avec courant triphasé. — Deux applications de ce système sont particulièrement célèbres. Elles ont acquis leur

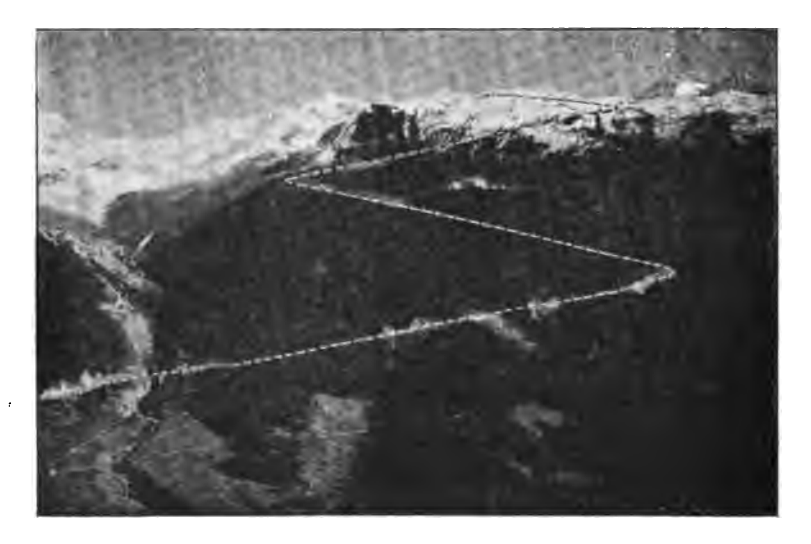


Fig. 434. — Chemin de fer du Gornergrat (tracé de la ligne).

réputation non pas seulement en raison des difficultés techniques qui ont été surmontées, mais parce qu'elles ont rendu accessibles

des sommets universellement connus, en raison de la beauté du panorama que l'œil y embrasse.

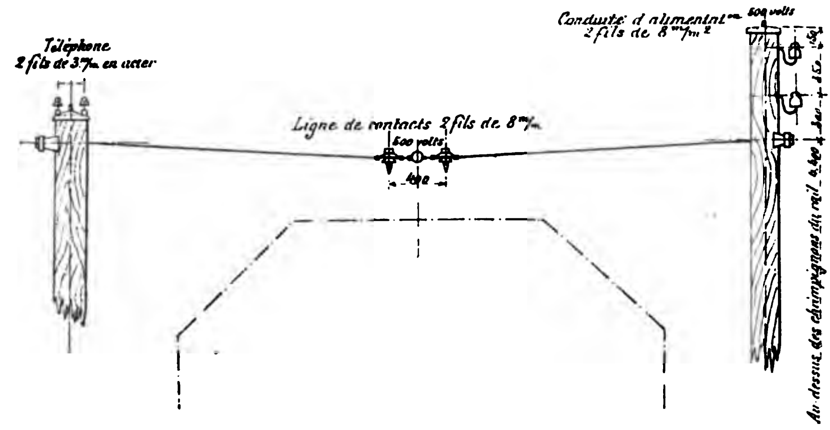


Fig. 435. — Suspension des conducteurs aériens en voie courante.

L'un de ces chemins de fer est celui de Zermatt au Gornergrat, aujourd'hui en pleine exploitation (fig. 434); l'autre gravit les

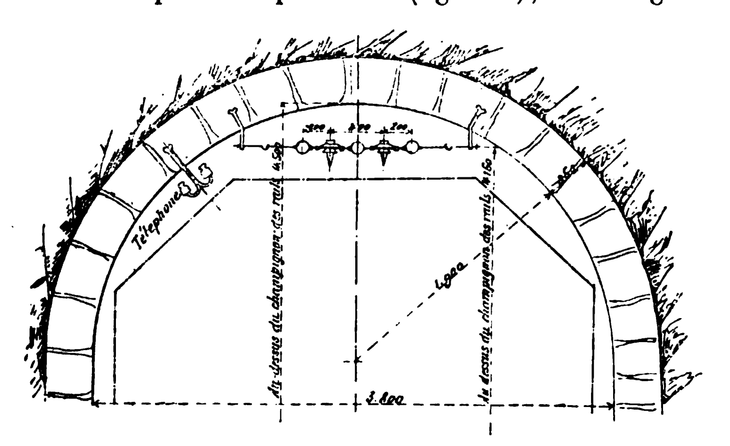


Fig. 436. — Suspension des conducteurs aériens dans les tunnels.

flancs escarpés de la Jungfrau (fig. 441). A la vérité, il faudra encore quelques années avant que la crémaillère de la Jungfrau

n'ait atteint le sommet de la montagne. Mais, peu à peu, elle poursuit sa marche ascendante et conduit déjà le touriste au milieu des neiges éternelles et des glaciers.

L'équipement électrique du chemin de fer du Gornergrat a été confié à MM. Brown-Boveri. La ligne, longue de 8 kilomètres, s'élève de 1 600 mètres, soit une pente moyenne de 200 millimètres par mètre. La station terminus est à la cote 3 018 mètres. On se rend de là à pied, en quelques minutes, au sommet du Gornergrat (3 136 mètres). La voie est à l'écartement d'un mètre. Elle est munie sur toute sa longueur et en son milieu d'une crémaillère Abt. Le courant est distribué au-dessus des voies par une double ligne aérienne, le retour se faisant par les rails. Les fils de distribution sont en cuivre, de 8 millimètres de diamètre. Ils sont écartés de 40 centimètres et sont soutenus, tous les 30 mètres environ, par des tendeurs prenant appui sur des poteaux en bois (voie courante) (fig. 455) ou sur des crochets scellés dans la maçonnerie (tunnels) (fig. 436). Le courant triphasé circulant dans la ligne aérienne a une tension de 540 volts et un nombre de périodes par seconde de 40. Il est produit, à la tension de 5 400 volts, dans une usine hydro-électrique qu'alimente une chute de 100 mètres, prise sur le Findelenbach. En trois points de la ligne, des transformateurs statiques ont été installés, pour abaisser la tension du courant primaire à 540 volts. Le transport du courant primaire entre l'usine et les postes de transformation s'effectue par des fils en cuivre de 8 millimètres, soutenus par l'une des rangées de poteaux de la ligne aérienne.

Les trains se composent d'une lomocotive poussant devant elle une voiture fermée et une voiture découverte. Le poids est de :

Locomotive	10,5	tonnes.
Voiture fermée	5,2	—
Voiture découverte	4,0	—
110 personnes à 75 kilogrammes	8,3	—
Total	28,0	tonnes.

La locomotive (fig. 437) comporte un châssis sur lequel sont

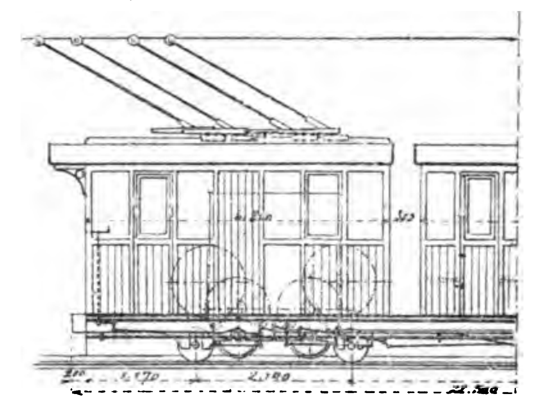


Fig. 437. — Locomotive électrique.

montés 2 moteurs triphasés de 90 chevaux, tournant normalement



Fig. 438. Moteurs à courants triphasés du Gornergrat.

à 800 tours par minute (fig. 438). Chaque moteur actionne

par un double jeu d'engrenages (rapport 12 à 1) une roue dentée engrénant avec la crémaillère (fig. 440). Le démarrage et le réglage de la vitesse s'opèrent à l'aide de résistances, que l'on insère sur le circuit de l'induit de chaque moteur. En marche normale la vitesse se maintient à la valeur constante de 7 kilomètres à l'heure.

La prise de courant se fait par une double paire de trolleys.

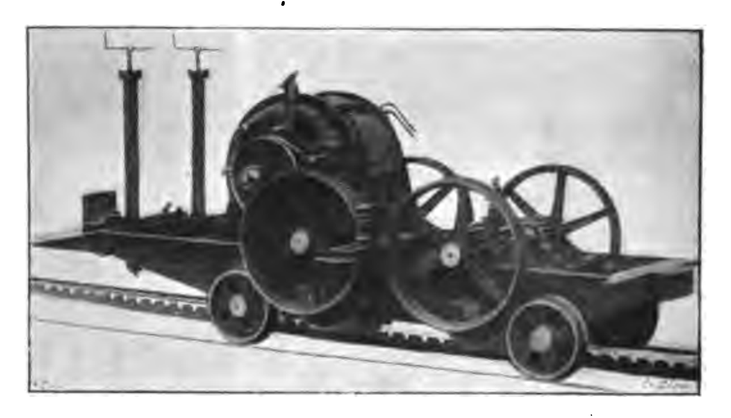


Fig. 439. — Locomotive du Gornergrat (châssis).

Dans chaque paire de trolleys, l'un est un peu en arrière de l'autre, afin de faciliter l'isolation.

L'ensemble du train présente une disposition intéressante au point de vue de la répartition des charges. La voiture fermée que pousse la locomotive ne repose que sur un bogie. Elle prend son second appui sur la locomotive même, augmentant ainsi le poids adhérent et empêchant tout soulèvement de la machine, en cas d'effort anormal. Grâce à cette disposition on peut développer très aisément un effort de traction de 6 000 kilogrammes.

Pour pouvoir arrêter la voiture instantanément, même sur la rampe la plus forte, on dispose d'abord d'un frein à main qui agit sur des poulies montées sur l'arbre des roues dentées actionnant la crémaillère, ensuite de deux freins de sécurité intervenant

automatiquement dès que le courant est interrompu ou que la vitesse dépasse un certain maximum.

Les moteurs agissent également comme freins, à la descente, en fournissant du courant qui revient à la station génératrice. Ils se comportent comme générateurs, dès que la vitesse dépasse légèrement celle du synchronisme. Dans le cas où plusieurs trains se trouveraient engagés simultanément sur la descente, il pour-

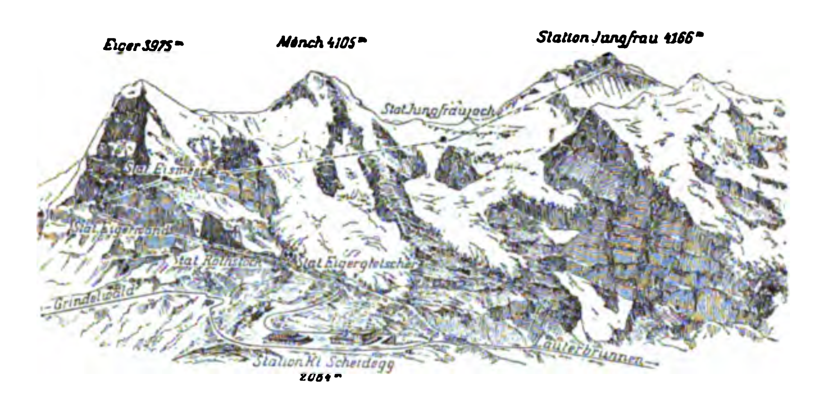


Fig. 440. — Tracé du chemin de fer de la Jungfrau.

rait arriver que, par suite du fonctionnement des moteurs des locomotives, comme générateurs, l'affux du courant ainsi produit, dépassât le débit des machines. Les turbines pourraient alors s'emballer. Aussi les a-t-on munies d'un régulateur qui insère, à ce moment, sur le circuit, des résistances appropriées.

Le service que permettent d'effectuer les locomotives du Gornergrat est remarquable par sa régularité. Les démarrages se font avec douceur et la constance de vitesse des moteurs donne à l'exploitation un caractère de sécurité fort apprécié des voyageurs. Aussi malgré un prix de transport très élevé (16 fr. aller et retour par personne) le chemin de fer est-il de plus en plus fréquenté par les touristes, qui peuvent profiter de la moindre éclaircie pour aller jouir pendant une heure ou deux d'un panorama incom-

parable, alors qu'il fallait autrefois une bonne journée pour entreprendre la même excursion.

Le *chemin de fer de la Jungfrau* part de la Petite-Scheidegg, sta-

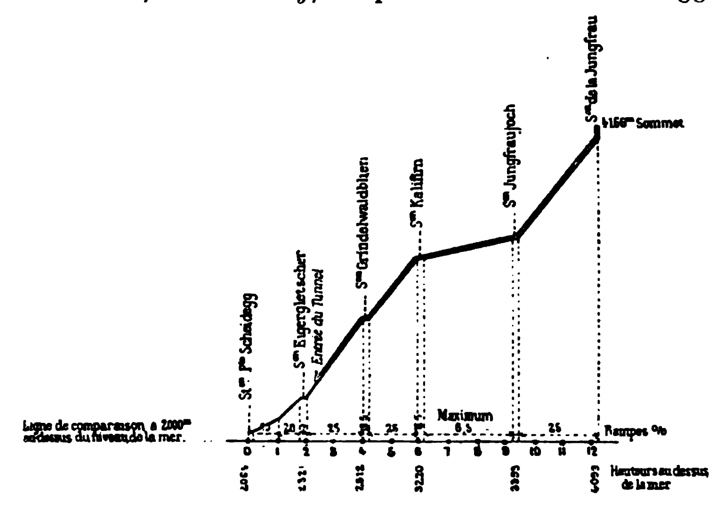


Fig. 441. — Profil en long du chemin de fer de la Jungfrau.

tion du chemin de fer de Lauterbrunnen, point qui est lui-même relié, par voie ferrée, à Interlaken (fig. 440).

La Petite-Scheidegg est à la cote 2 064 mètres et celle du

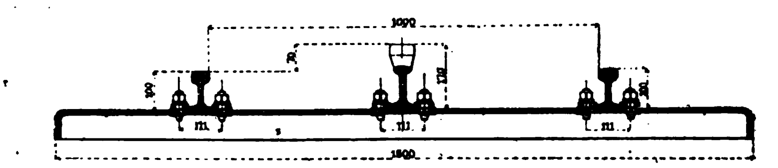


Fig. 442. — Coupe transversale de la voie.

sommet de la Jungfrau est de 4 166 mètres. On a donc à s'élever de 2 102 mètres. Cette différence de niveau est franchie jusqu'à la cote 4 093 mètres par le chemin de fer à crémaillère (fig. 441). Le terminus se trouve sous le sommet, que l'on gagnera par un ascenseur de 73 mètres de hauteur.

La longueur de la ligne est d'environ 12 kilomètres. Le maximum des rampes est de 25 p. 100. La voie n'est à air libre que sur les

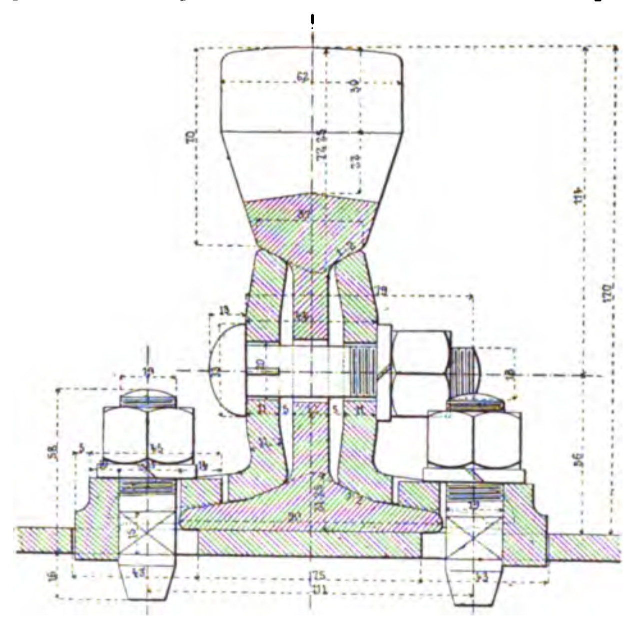


Fig. 443. — Dent de la crémaillère.

premiers 1 500 mètres. Sur les 10 500 mètres restant, le chemin de fer est en souterrain.

La voie a l'écartement d'un mètre (fig. 442). La crémaillère

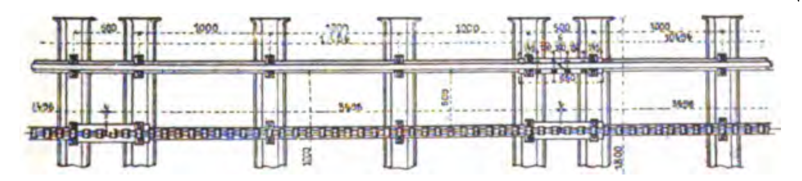


Fig. 444. — Plan de pose de la crémaillère.

rappelle le type Abt, mais avec des modifications donnant aux locomotives une sécurité plus grande, soit en cas de soulèvement de la machine, soit en cas de déraillement. Ces modifications, qui

portent surtout sur la forme des dents de la crémaillère (fig 443), permettent, en effet, l'emploi de mâchoires, prenant appui sur la partie évasée des dents et qui agissent à la fois comme frein et comme appareil de serrage et de fixation.

Cette crémaillère, ainsi modifiée, a été étudiée avec ses accessoires par M. Strub. Elle est livrée par tronçons de 3,50 m. que retiennent des éclisses cornières. Les traverses, qui sont en acier, pèsent 37 kilogrammes; elles supportent à la fois la voie, qui est

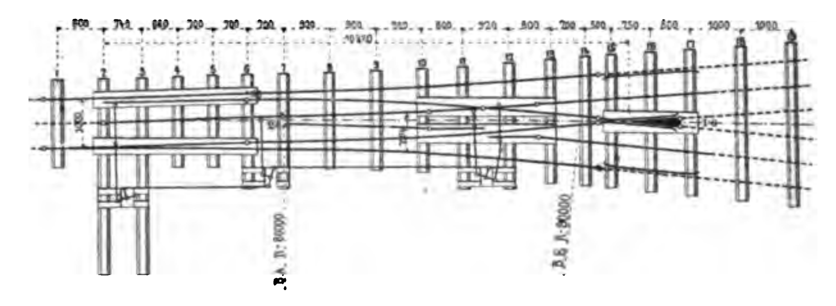


Fig. 445. — Aiguillage.

en rails de 20,6 kg. au mètre courant, et la crémaillère (fig. 444). Le poids de l'infrastructure métallique atteint 125 kilogrammes par mètre courant.

Comme la crémaillère est surélevée de 70 millimètres par rapport aux rails de roulement, des dispositions ont dû être prises, aux croisements, pour assurer le passage des roues des véhicules. Elles consistent simplement à ménager dans la crémaillère des parties mobiles que l'on ouvre ou que l'on ferme en même temps que l'aiguille de croisement (fig. 445).

Les stations seront au nombre de 6, dont 4 en tunnel. Sur les dernières, 3 disposeront de grandes salles avec vue sur les plus belles parties de la montagne; la dernière station, celle de la Jungfrau, sera complètement souterraine; mais elle sera munie, comme on l'a dit plus haut, d'un ascenseur conduisant au sommet.

L'électricité est produite sous forme de courant triphasé, à la tension de 7 000 volts et à la fréquence 38, par une usine hydro-électrique, établie sur la Lutschine Blanche, à Lauterbrunnen et disposant d'une chute utile de 35,50 m.[1] Cette usine comprend



Fig. 416. — Poste de transformation.

trois groupes de turbines : 2 turbines Girard de 500 chevaux, tournant à 380 tours par minute et actionnant directement des alternateurs Œrlikon de même puissance, 2 turbines Francis de 800 chevaux, tournant à 380 tours par minute et actionnant égale-

[1] La Société exploitante dispose également sur la Lutchine Noire d'une chute de 8 000 chevaux. Mais celle-ci ne sera aménagée que plus tard, lorsque les besoins du trafic le nécessiteront.

ment des alternateurs Œrlikon de 800 chevaux; 2 turbines de 25 chevaux pour l'excitation.

Le courant, à sa sortie de l'usine, suit une ligne aérienne



Fig. 417. — Chemin de fer de la Jungfrau (ligne aérienne).

constituée par 3 fils de cuivre de 7,5 mm. de diamètre supportés par des isolateurs en porcelaine à triple cloche, fixés tous les 30 mètres à des poteaux en bois imprégné. Ces poteaux ont

12 mètres de hauteur. Ils sont scellés dans une fondation en béton de 1,50 m. à 2 mètres de profondeur. Dans les parties en tunnel la ligne primaire est constituée par un câble isolé.

La transformation du courant à 7 000 volts en courant à 500 volts, tension de la ligne à trolley, s'effectue dans des postes

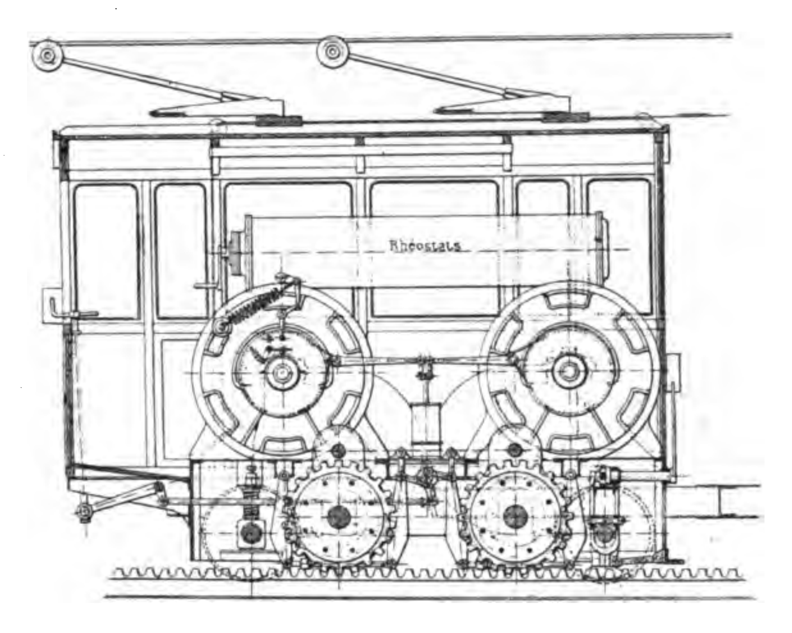


Fig. 448. — Locomotive de la Jungfrau (Brown-Boveri).

de transformation, situés dans les gares (fig. 446). Les transformateurs se composent de trois noyaux autour desquels sont placés concentriquement les bobines primaires et secondaires.

La ligne aérienne (fig. 447) comporte deux fils longitudinaux, en cuivre, de 9 millimètres de diamètre, suspendus à des tendeurs en acier fixés à des poteaux en bois ou à des crampons scellés dans la maçonnerie des tunnels. L'isolement est double : aux points d'attache des conducteurs et aux points de fixation des tendeurs. Le retour du courant a lieu par les rails, qui sont éclissés élec-

triquement par des fils de cuivre de 7 millimètres de diamètre.

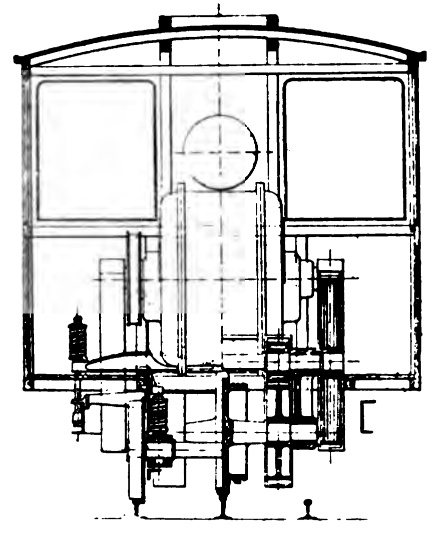


Fig. 449. — Coupe transversale de la locomotive Brown-Boveri.

Les trains se composent d'une locomotive poussant devant elle deux voitures. La première de ces deux voitures prend appui d'une part sur un bogie, d'autre part sur la locomotive elle-même, afin d'en augmenter l'adhérence.

Un train pesant 26 tonnes, il faut, pour le déplacer sur rampe de 25 millimètres, à la vitesse de 8 kilomètres à l'heure, une puissance de 212 chevaux. On a pris, pour être un peu large, par locomotive, 2 moteurs de 130 à 150 chevaux.

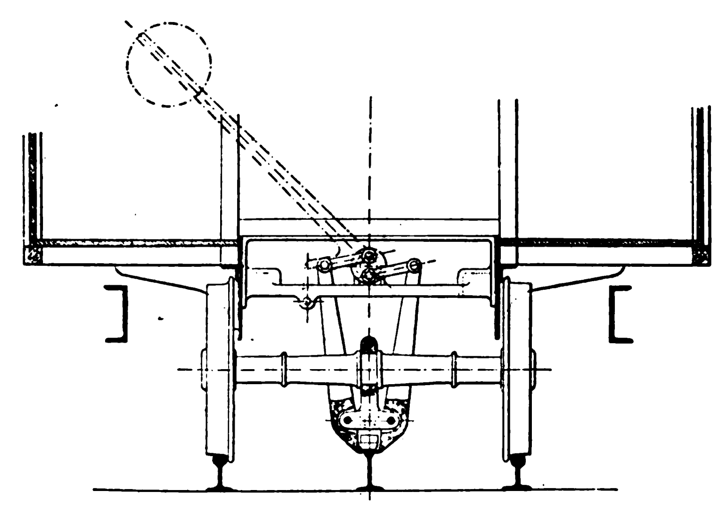


Fig. 450. — Frein à mâchoires.

Les locomotives sont de deux types : les unes ont été fournies

par la maison Brown-Boveri et rappellent les locomotives du Gornergrat (fig. 448 et 449). Toutefois elles sont munies du frein à mâchoires, système dont l'emploi est rendu possible par suite des dispositions spéciales de la crémaillère Strub (fig. 450.)



Fig. 451. — Chemin de fer de la Jungfrau (locomotive Œrlikon).

Deux autres systèmes de freinage sont d'ailleurs installés : un frein à main agissant sur l'arbre des pignons de la crémaillère, et un frein à lames, à commande électrique, qui actionne l'arbre des moteurs et coupe le courant en même temps que le freinage s'effectue. On peut commander ce frein, par une corde, d'un bout à l'autre du train. Le démarrage et le réglage de la vitesse se font, comme au Gornergrat, par l'insertion de résistances sur les induits des moteurs.

Les locomotives du deuxième type proviennent des ateliers Œrlikon (fig. 451). Elles sont à 2 moteurs de 120 chevaux, tournant à 750 tours. Chaque moteur pèse 2 100 kilogrammes. Pour une charge de 120 chevaux, ces moteurs ont :

Un rendement de 92 p. 100;

Un facteur de puissance de 90 p. 100 ;

Un glissement de 1,5 p. 100 ;

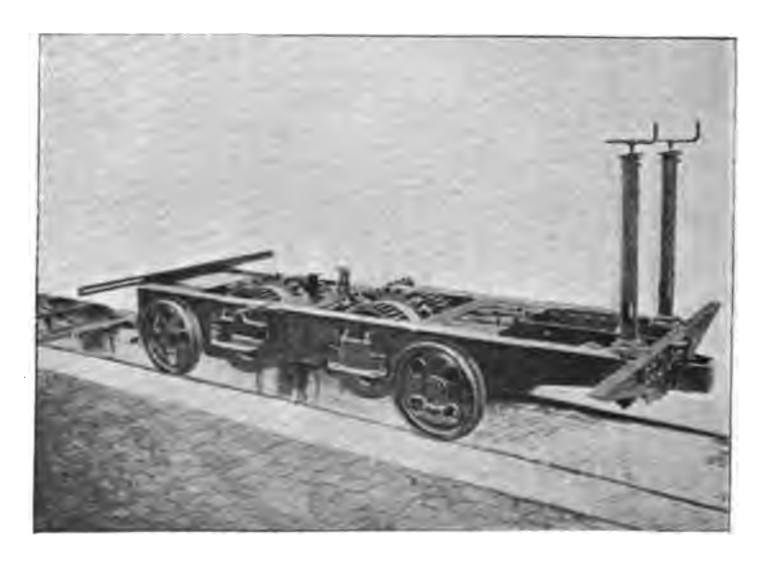


Fig. 452. — Truck de la locomotive Œrlikon.

Le courant maximum en court circuit, à la tension de 500 volts, est de 800 ampères. Le couple maximum est environ triple du couple normal, le courant étant dans le premier cas, de 570 ampères et, dans le second, de 130 ampères.

L'attaque de la roue dentée engrénant avec la crémaillère se fait, comme dans la locomotive Brown-Boveri, par des engrenages avec double réduction (rapport 12,7 à 1) (fig. 452). La prise de courant consiste en une sorte de spatule, avec surface de frottement en aluminium, glissant sur les conducteurs aériens. Les

constructeurs ont préféré ce système à celui de la roulette, en raison de la forte intensité qui doit, à certains moments, passer par le contact.

La caractéristique principale des locomotives Œrlikon est l'intervention du courant continu, pour effectuer le freinage électrique, à la descente. On a vu que les moteurs triphasés fonctionnent comme générateurs à la descente et qu'ils maintiennent

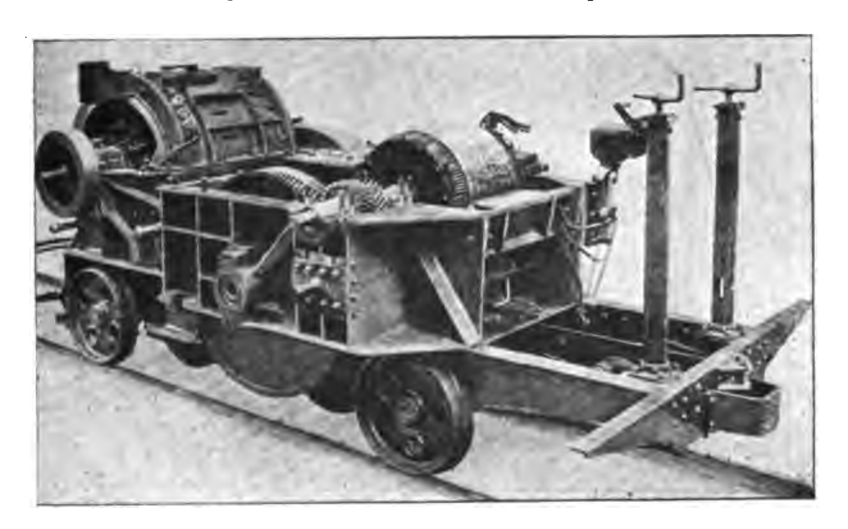


Fig. 453. — Moteurs et dynamo de la locomotive Œrlikon.

leur vitesse à peu près à la valeur du synchronisme, envoyant alors du courant à l'usine. Mais il peut en résulter des inconvénients graves pour les turbines qui risquent de se trouver subitement déchargées et de s'emballer. Nous avons indiqué, en parlant du chemin de fer de Gornergrat, comment on avait paré à cet inconvénient. La maison Œrlikon a craint qu'avec les à-coups qui peuvent se produire sur le chemin de fer de la Jungfrau, le réglage des turbines ne devînt parfois impossible. Aussi a-t-elle renoncé à envoyer sur la ligne le courant produit par les moteurs. Afin, d'autre part, de pouvoir régler aisément l'intensité

de ce courant et par suite l'action de freinage des moteurs, elle supprime toute communication avec la ligne aérienne et alimente le stator des moteurs par un petit moteur à courant continu, monté sur l'extrémité du rotor (fig. 453). Le stator donne lieu, dès lors, à un champ magnétique fixe et le rotor, qui tourne dans ce champ, produit du courant alternatif triphasé que l'on envoie

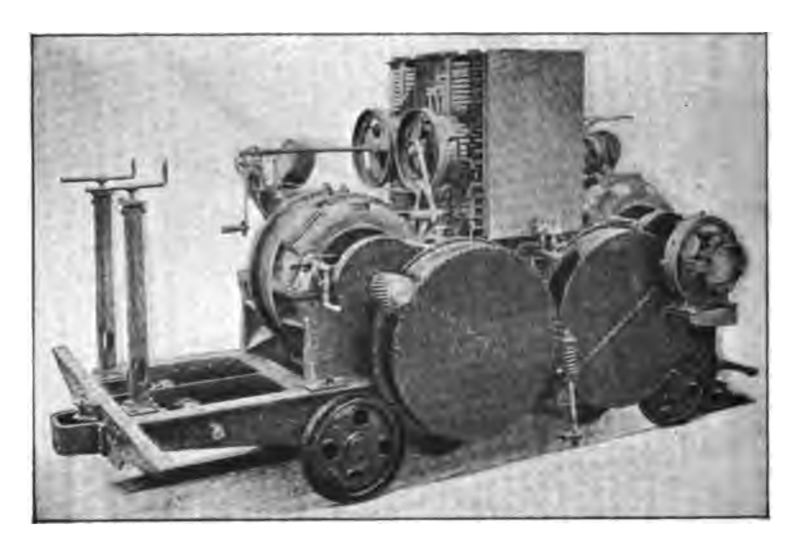


Fig. 454. — Locomotive Œrlikon, avec résistances.

dans les résistances de démarrage[1]. En faisant varier le champ on fait également varier l'intensité du courant et l'on dispose, par conséquent, d'un moyen de freinage excessivement souple, tout en mettant le train dans une indépendance absolue, par rapport à l'usine. La variation du champ magnétique, ou plutôt du

[1] Ces résistances sont ventilées à l'aide d'un petit ventilateur mis en mouvement par un moteur à courants triphasés d'un cheval et demi, que l'on peut alimenter soit avec le courant de la ligne, soit avec le courant produit par le rotor des moteurs.

Il est à remarquer que le rotor pourrait être bobiné de manière à donner du courant continu; dans ces conditions la petite dynamo auxiliaire deviendrait sans objet. De nouvelles locomotives ainsi combinées ont été commandées à la maison Brown-Boveri.

courant inducteur s'obtient d'ailleurs aisément, en agissant sur l'excitation de la petite dynamo.

Il est clair que ce système de freinage ne permet pas l'arrêt, car la dynamo aurait, à ce moment, une vitesse nulle et ne pourrait plus envoyer de courant dans le stator. Mais cet arrêt s'obtient très aisément avec le frein mécanique, combiné avec le frein à mâchoires dont il a été parlé plus haut.

Dans un premier modèle (dit locomotive 403) (fig. 454) la maison Œrlikon s'était contentée d'adopter un dispositif permettant de placer les résistances de démarrage sur le circuit primaire, ces résistances recevant alors le courant de récupération produit par les moteurs et soulageant la station centrale. Mais elle a préféré finalement, comme donnant une sécurité plus grande, l'excitation spéciale par courant continu.

Nous avons, enfin, à dire quelques mots d'une installation mixte que nous avons déjà étudiée en tant que chemin de fer à courant triphasé et à simple adhérence. Il s'agit de la ligne reliant Stanstad à Engelberg et dont une partie est à crémaillère avec rampes de 25 p. 100.

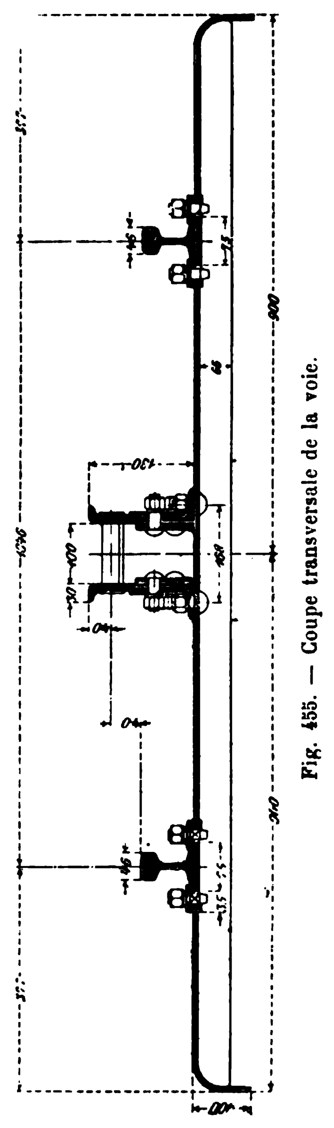


Fig. 455. — Coupe transversale de la voie.

La figure 455 montre la coupe de la voie et de la crémaillère. Cette dernière (du système Riggenbach) a une forme trapézoïdale et est

constituée par des dents en acier, rivées dans deux plaques de même métal. Les traverses, en acier, sont réparties comme l'indique le plan, figure 456. Les locomotives qui poussent, dans la rampe de 25 millimètres, les automotrices circulant par leurs propres

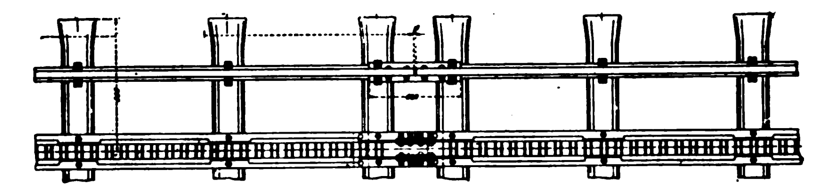


Fig. 456. — Plan de pose de la voie et la crémaillère.

moyens dans les parties de la ligne à simple adhérence sont du type Brown-Boveri (fig. 457, 458, 459). Elles pèsent 12 tonnes et sont munies de 2 moteurs triphasés de 175 chevaux. Un embrayage

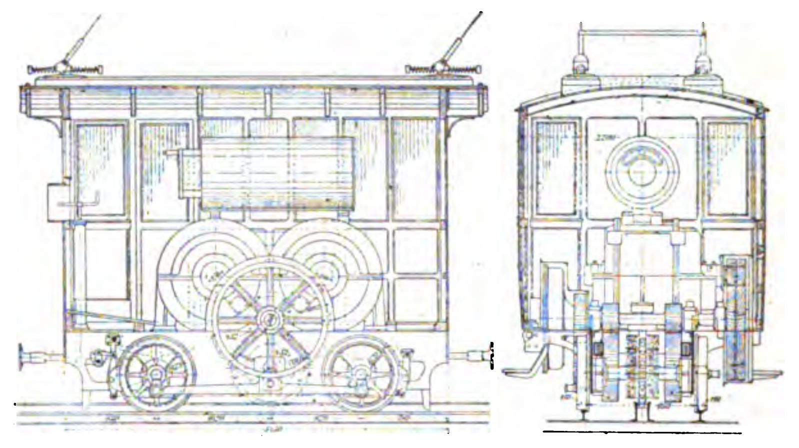


Fig. 457. — Chemin de fer de Stanstad à Engelberg. Locomotive Brown-Boveri (coupe longitudinale et coupe transversale).

à friction permet aux moteurs soit d'actionner les roues, et alors la locomotive marche par adhérence, soit d'attaquer la crémaillère.

Nous n'insisterons pas sur le démarrage et le réglage de la vitesse, qui s'effectuent selon les procédés déjà décrits.

La prise de courant se fait par deux archets à bras isolés.

En un point particulier (chemin de Grünenwald) une disposition intéressante a dû être prise pour permettre aux voitures de

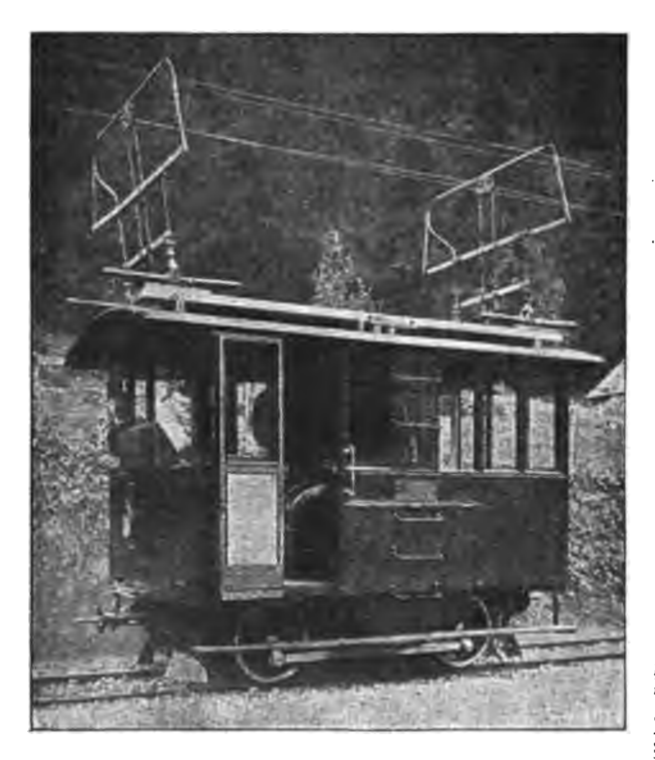


Fig. 458. — Vue d'ensemble de la locomotive.

passer par-dessus la crémaillère. Elle consiste en un pont-levis, manœuvrable à la main et qui, en même temps qu'il se soulève, rabat les conducteurs de prise de courant (fig 460 et 461), Il faut, en effet, que ces conducteurs soient en temps normal à une assez grande hauteur, afin qu'ils ne puissent être heurtés par les voitures de foin ou de paille, empruntant le pont-levis.

Monorails électriques. — Les chemins de fer monorails n'utili-



Fig. 459. — Chemin de fer de Stanstad à Engelberg (locomotive poussant une automotrice).



Fig. 460. — Crémaillère à l'emplacement d'un passage à niveau.

sent, comme leur nom l'indique, qu'un seul rail de roulement.



Fig. 461. — Pont rabattu sur la crémaillère.

Avec un tel système, on diminue donc notablement les frottements, en même temps que l'on facilite le passage du matériel dans des courbes extrêmement raides.

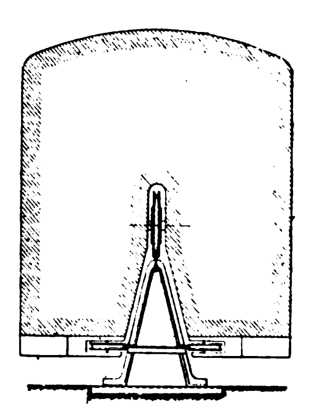


Fig. 462. — Monorail Lartigue.

Ces avantages spéciaux ont depuis longtemps frappé l'attention des inventeurs ; mais certaines difficultés, notamment celles du guidage des voitures, avaient, jusque dans ces dernières années, empêché le système de prendre un développement réellement pratique. Or, par un phénomène qui n'est pas rare dans

les annales de la science industrielle, on s'éloignait d'autant plus de la solution que l'on cherchait une amélioration plus grande de ce côté et, en fait, le seul système de monorail qui ait l'objet jusqu'ici d'une exploitation régulière, fonctionne sans guidage (voy. page 521).

Le premier monorail qui ait été exécuté a été construit par

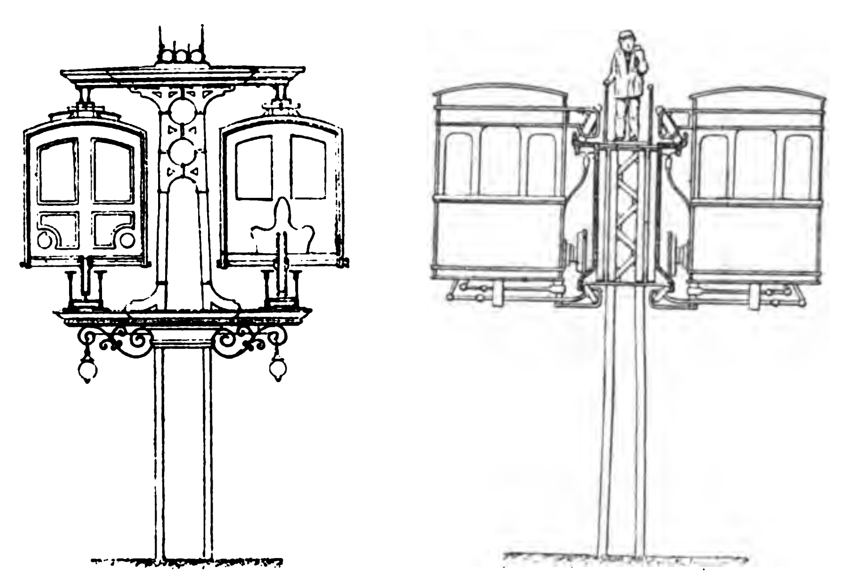


Fig. 463. — Monorail Beyer. Fig. 464. — Monorail Cook.

M. Lartigue, entre Feurs et Panissières (France). Le principe est celui qu'indique la figure 462. Les véhicules sont, pour ainsi dire, à cheval sur un rail central que supporte une infrastructure métallique. Pour empêcher tout déversement, des roues latérales, de guidage, appuient sur deux petits rails continus, fixés sur les côtés du support métallique.

Ce système a été repris par M. Behr, en vue de son adaptation aux grandes vitesses. A cet effet le nombre des rails de guidage a été porté de 2 à 4. Bien que l'essai que M. Berh a tenté, à

Tervueren, pendant l'Exposition de Bruxelles de 1897, n'ait pas donné des résultats très concluants, on doit, prochainement, l'appliquer à une ligne très importante, que l'on veut établir entre Manchester et Liverpool [1].

Dans le *système Beyer* (fig. 463) les voitures sont guidées par leur partie supérieure et elles roulent sur un rail régnant au-

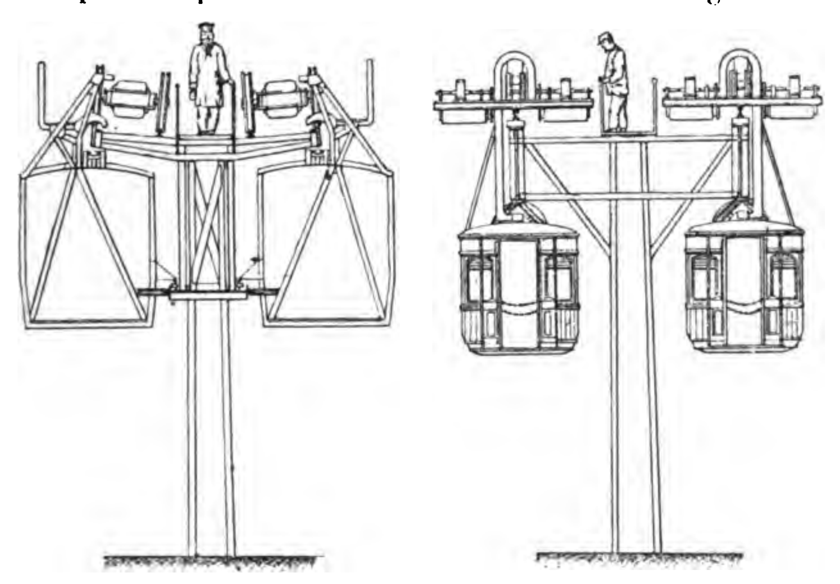


Fig. 465. — Monorail Diétrich. Fig. 466. — Monorail Enos.

dessous d'elles. L'infrastructure métallique se trouve, de ce fait, assez compliquée puisque, pour le guidage et le roulement, il faut deux poutres continues.

Ces inconvénients sont moindres dans le *système Cook*, les poutres de roulement et de guidage étant rapprochées des piliers de support; mais le système n'en comporte pas moins deux voies continues (fig. 464).

Le *monorail Diétrich* a pour caractéristique une suspension des voitures en porte-à-faux, avec guidage horizontal (fig. 465). Au

[1] *Tramway and Railway World* (13 novembre 1903).

contraire dans le *monorail Enos* (fig. 466) les voitures sont posées bien d'aplomb sur le rail de roulement et les moteurs sont équilibrés de part et d'autre de la roue de roulement. Le guidage se fait au-dessous de la caisse des voitures par deux galets inclinés s'appuyant sur une semelle continue. C'est une suspension ana-

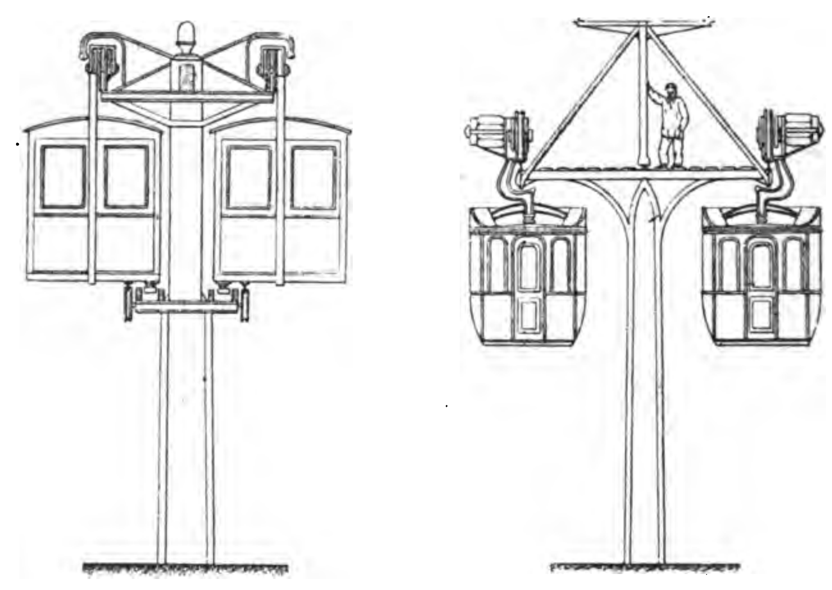


Fig. 467. — Monorail Perlay-Hale.

Fig. 468. — Monorail Langen.

logue qui a été réalisée dans le *monorail Perlay-Hale*, mais toutefois avec galet de guidage sous la voiture (fig. 466).

Enfin dans le *système Langen* (fig. 467), il n'y a plus de guidage et les voitures sont librement suspendues à leur partie supérieure par une sorte de grand crochet, muni de roues à la fois porteuses et motrices. L'expérience prouve, d'ailleurs, que les déplacements que peut prendre la voiture ne sont nullement désagréables pour les voyageurs[1] et que pendant ces

[1] Il est bon, cependant, dans les courbes raides, de ne pas trop regarder les objets extérieurs, qui ne paraissent plus d'aplomb, en raison du devers de la voiture.

déplacements le système ne perd en rien de sa stabilité et de sa sécurité.

Monorail Behr-Lartigue. — La voiture que M. Behr a mis en service à Tervueren, pendant l'exposition de 1897, est représentée par les figures 469 et 470. Elle se compose pour ainsi dire de deux trucks, chacun à quatre roues porteuses, de 1,37 m. de diamètre et à 16 roues de guidage. Dans chaque truck les deux roues centrales étaient actionnées, à l'aide de chaînes sans fin, par deux moteurs de 150 chevaux placés dans la partie inférieure de la voiture, de part et d'autre de l'axe longitudinal.

Le courant était pris par des roulettes à bielle sur un rail isolé.

La manœuvre des moteurs s'effectuait dans deux cabines situées aux extrémités de la voiture. La longueur de la caisse était de 18 mètres, sa largeur de 3,12 m. et l'intérieur était occupé par 4 rangées de fauteuils offrant un total de 93 places. Le poids du véhicule atteignait 72 tonnes en charge.

Fig. 469. — Chemin de fer monorail, système Behr (coupe longitudinale de la voiture automotrice).

Le rail porteur était supporté tous les mètres par un chevalet métallique, reposant sur une traverse métallique de 1,52 m. de longueur, enfouie dans du ballast (fig. 471). Sur les deux flancs des chevalets régnaient les rails de guidage, au nombre de 4, et qui contribuaient, comme le rail por-

teur, à assurer le contreventement longitudinal des chevalets.

On avait construit à Tervueren une ligne de 4 871 mètres de longueur, comprenant deux alignements droits raccordés par des courbes de 500 mètres de rayon. On espérait pouvoir réaliser des

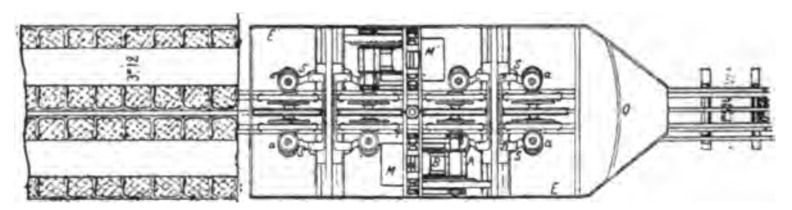


Fig. 470. — Plan.

vitesses de 155 kilomètres à l'heure; mais on ne put dépasser 100 kilomètres, avec une dépense de courant excessive, occasionnée principalement par les déformations de la voie dans les parties courbes, sous l'action des efforts produits par la force centrifuge. On sait que, dans une voie ordinaire à 2 rails, ces efforts sont déjà très considérables et qu'on les atténue par un dévers approprié. Mais ce dévers n'est convenable que pour une vitesse déterminée. En outre, si l'on veut éviter des chocs nuisibles à l'entrée dans les courbes, il faut combiner des raccordements paraboliques d'autant plus soignés que la vitesse est plus grande.

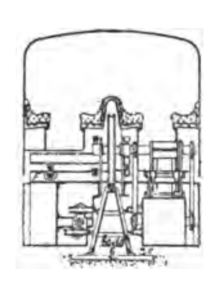


Fig. 471. — Coupe transversale.

Avec 4 rails, la difficulté se trouve considérablement augmentée et c'est faute d'avoir pu la surmonter, à Tervueren, que l'on ne put tirer aucune conclusion certaine, en vue de l'application possible du système au transport des voyageurs.

Cependant l'inventeur a, depuis, apporté des améliorations nombreuses à son système et un acte du Parlement anglais du 17 août 1901 en a autorisé l'application à une ligne de 55 kilo-

mètres de longueur entre Liverpool et Manchester. La vitesse pourra atteindre 175 kilomètres à l'heure. Le trajet se ferait en 20 minutes, avec départs toutes les 10 minutes.

Le chevalet supportera à son sommet un rail de roulement pesant 51 kilogrammes par mètre courant et, sur chaque côté, deux rails de guidage de 15 kilogrammes.

Les rampes atteindront 40 millimètres par mètre.

Les voitures seront de différents types pouvant contenir 72, 50 ou 38 places. Les dernières pèseront 39 tonnes et seront actionnées par 4 moteurs de 160 chevaux tournant à 720 tours.

Le courant sera pris par des frotteurs sur deux rails à 650 volts, isolés (courant continu); fixés sur les côtés du chevalet, ce courant proviendra lui-même de 5 sous-stations alimentées par une distribution par courant triphasé à 15 000 volts.

Bien que la ligne soit à double voie, comportant par conséquent deux rangées de chevalets, elle comportera tout un ensemble de signaux électriques automatiques [1].

La dépense est évaluée à 70 000 000 francs.

Monorail Langen. — Le système Langen a été appliqué à une ligne de 13,2 km. de longueur, allant de Barmen à Elberfeld et à Rittershausen [2].

Cette ligne présente cette particularité curieuse que, sur la plus grande partie de son parcours, elle est établie au-dessus d'une rivière (la Wupper) (fig. 472). Des piliers métalliques inclinés, prenant leur appui sur l'une et l'autre rive (fig. 473), supportent une poutre à treillis, ayant une forme triangulaire et comportant, dans le plan supérieur, 2 poutres horizontales contreventées, puis, dans le plan inférieur, une poutre horizontale à égale distance des deux premières (fig. 474). C'est à la partie inférieure de cette poutre que sont fixées des longrines supportant, à leurs

[1] *Tramway and Railway World* (13 novembre 1902).

[2] *Revue générale des chemins de fer*, janvier 1902. — *L'Eclairage électrique*, 13 juillet 1901, 8 août 1903.

extrémités, les rails de roulement. Un contreventement oblique



Fig. 472. — Chemin de fer monorail (système Langen) de Barmen à Elberfeld (vue générale).

relie, d'ailleurs, l'extrémité des longrines au contreventement supérieur de la poutre.

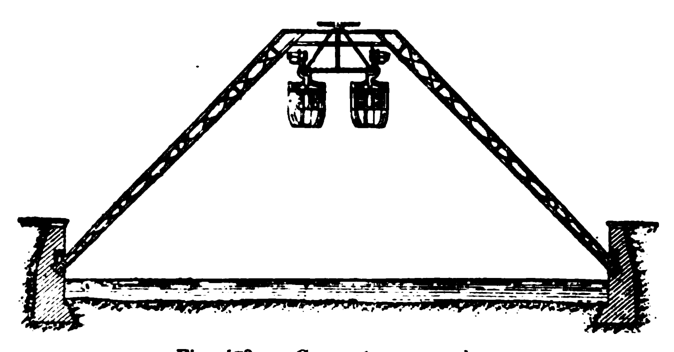


Fig. 473. — Coupe transversale.

Dans les courbes les longrines sont dissymétriques par rapport aux points d'attache et enfin, dans les gares à quai central, elles

ont une longueur plus grande qu'en voie courante en alignement droit (10 metres au lieu de 4 mètres).

Pour la partie du tracé où la voie ne passe plus au-dessus de la Wupper, les piliers sont en forme d'arceaux (fig. 475 et 476).

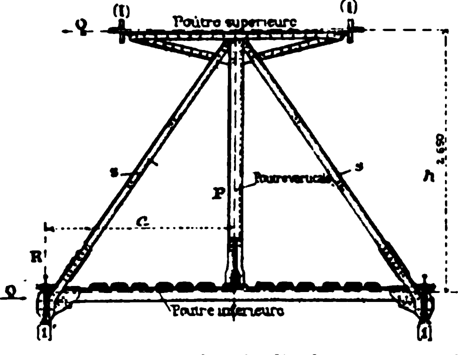


Fig. 474. — Poutre longitudinale supportant la voie.

La hauteur des rails au-dessus des voies publiques est de 8 mètres, afin de laisser sous les voitures une hauteur libre de 4,50 m. (fig. 477). Les rampes et pentes sont très variables, avec un maximum de 27 millimètres par mètre; ce dernier chiffre pourrait d'ailleurs être fortement dépassé.



Fig. 475. — Voie sur arceaux.

Les deux voies, dont l'écartement normal est de 4 mètres, se rejoignent à leurs extrémités par des courbes de 30 mètres de rayon, de manière à former un circuit fermé (fig. 478). Une boucle intermédiaire a été prévue à la station du Jardin zoolo-

gique, afin de permettre aux voitures de revenir en arrière sans aller jusqu'au terminus. En ce point une aiguille doit forcément exister et la figure 479 en montre l'ossature.

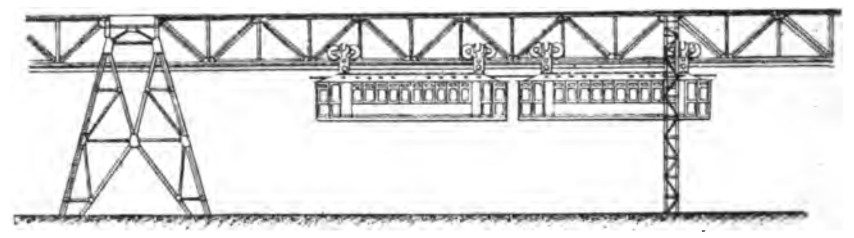


Fig. 476. — Voie sur arceaux (coupe longitudinale.

En voie courante les courbes ne descendent pas au-dessous de 75 mètres. Ces courbes sont franchies avec la plus grande faci-



Fig. 477. — Passage au-dessus des voies publiques.

lité, avec des vitesses de 40 à 50 kilomètres à l'heure. Aussi, malgré le tracé sinueux de la voie, peut-on, sur le chemin de fer de Barmen, réaliser, comme nous le verrons plus loin, une vitesse moyenne très élevée.

Les voitures sont suspendues par deux points situés à 8 mètres

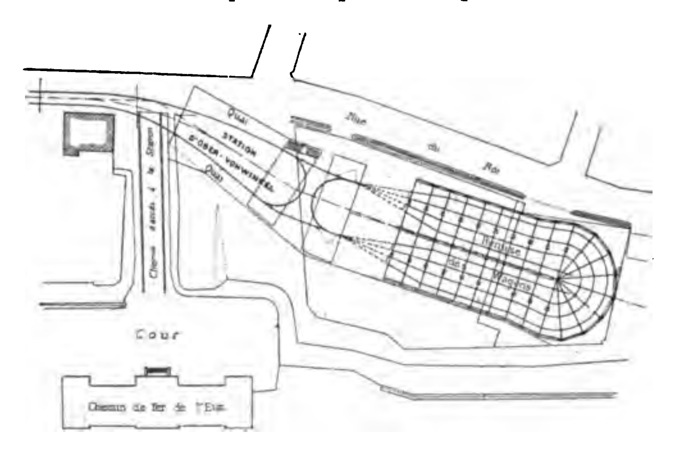


Fig. 478. — Boucle de raccordement au terminus.

de distance (fig. 480.) La suspension se fait sur ressorts, par un



Fig. 479. — Aiguillage.

pivot fixé au crochet de suspension, lequel s'appuie sur les boîtes à huile de 2 roues à gorge (fig. 481 et 482.) Le moteur électrique,

d'une puissance de 38 chevaux, placé au sommet et dans l'axe

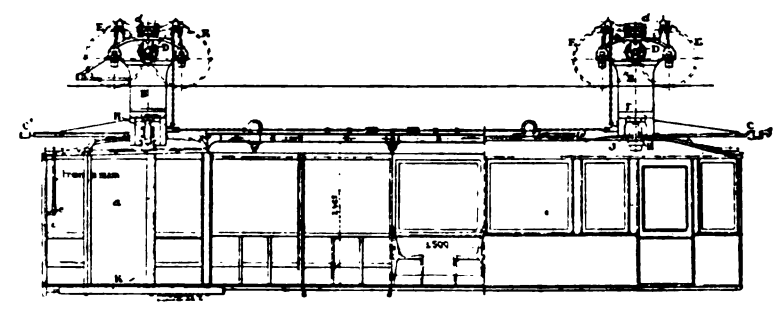


Fig. 480. — Mode de support de la voiture.

du crochet, actionne les roues par l'intermédiaire d'engrenages. Du côté intérieur, c'est-à-dire du côté de la poutre, le crochet entourant les roues porte un mentonnet de sûreté, qui s'oppose aux déraillements. Cette poutre est d'ail-

Fig. 481. — Crochet de suspension avec son moteur.

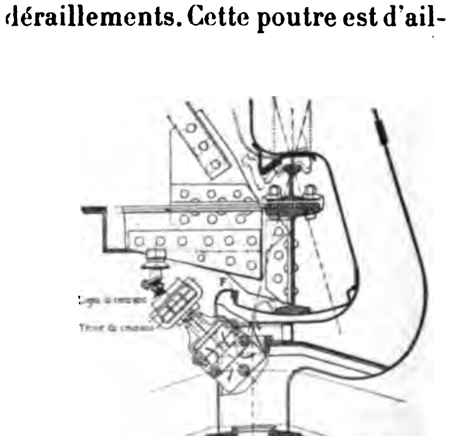


Fig. 482. — Détail du crochet de suspension.

leurs établie de telle façon qu'elle laisse possible le libre dépla-

cement de la voiture et de son crochet, par suite de la force centrifuge, dans les courbes (fig. 483).

Il y a un moteur par crochet et dans chaque voiture le couplage des moteurs s'effectue par la méthode série-parallèle.

La distribution électrique se fait par un conducteur nu

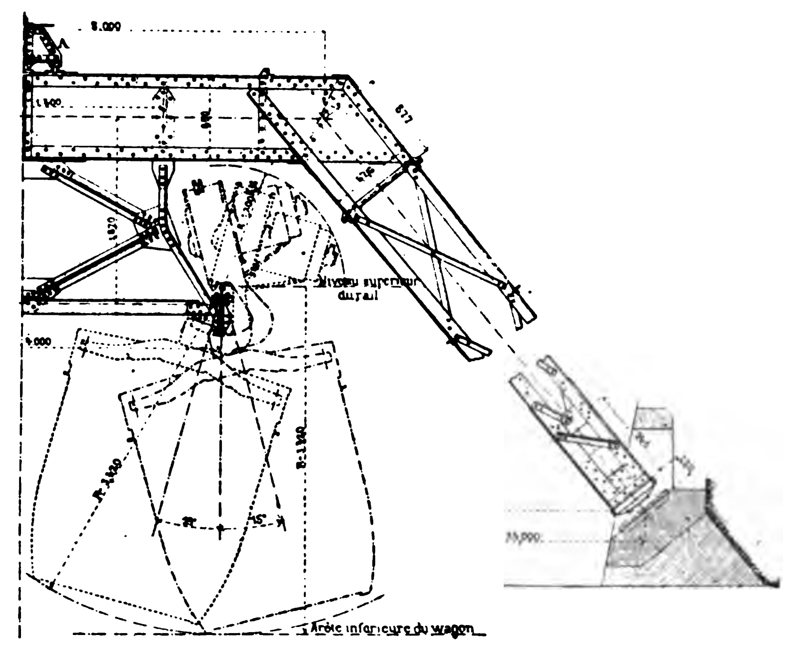


Fig. 483. — Déplacement des voitures dans les courbes par suite de la force centrifuge.

à 550 volts, sur lequel le courant est pris à l'aide d'un frotteur à ressorts.

On dispose pour freiner, comme dans un chemin de fer ordinaire, soit des moteurs eux-mêmes, soit d'un frein à air comprimé. L'air comprimé nécessaire à la manœuvre du frein est renfermé dans des tuyaux placés sous le plancher de la voiture et que l'on charge aux terminus. Le frein peut également être actionné à la main.

Les stations sont au nombre de 20. Elles sont généralement à quais latéraux avec trottoirs en contre-bas de 0m. 20 par rapport au plancher des voitures (fig. 484).

L'expérience a prouvé qu'avec les voitures du monorail Langen, on pouvait réaliser une vitesse commerciale très élevée. Le fait tient non seulement au passage en vitesse des courbes, mais aussi

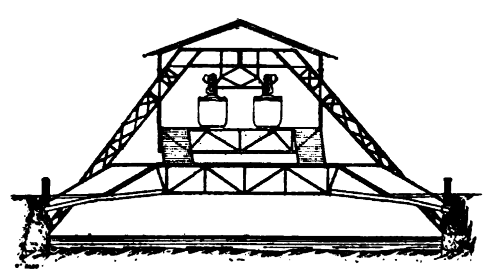


Fig. 484. — Coupe transversale d'une station.

à la rapidité des démarrages. Le tableau suivant met bien en évidence les avantages du système Langen au point de vue de la vitesse réalisable.

Longueur de la ligne.	13,3 km.
Nombre de stations	20
Distance moyenne des stations	900 mètres.
Durée des arrêts.	15 secondes.
Durée du parcours total	30 minutes.
Vitesse moyenne.	36 km. à l'heure
Vitesse maxima	50 —

On saisira particulièrement les avantages du monorail Langen quand on se rappellera que, sur les plus récents métropolitains électriques, la vitesse commerciale dépasse rarement 22 à 23 kilomètres à l'heure.

En somme, le monorail Langen se présente non seulement comme un système des plus ingénieux, pour l'application duquel il a fallu combiner des dispositions nouvelles qui font le plus grand honneur à l'inventeur et aux constructeurs; il donne,

pour les transports extra-rapides, une solution élégante, pouvant même, selon les conditions du tracé, présenter des avantages sérieux, au double titre du premier établissement et des dépenses d'exploitation [1].

Les voitures du monorail Langen consomment 29 watts-heure par tonne-kilomètre.

Les dépenses de premier établissement ont atteint 625 000 francs par kilomètre.

Funiculaires électriques. — Dans les funiculaires électriques, l'électricité n'a plus un rôle aussi immédiat que dans les crémaillères électriques. Il ne s'agit plus, en effet, de faire mouvoir une voiture, en mettant en œuvre les qualités si précieuses des moteurs électriques de traction ; dans le cas du funiculaire, la voiture est inerte et, pour la déplacer, on la remorque par un câble qui s'enroule sur un tambour moteur, au sommet de la ligne.

L'électricité ne s'impose plus d'une façon indiscutable pour actionner ce tambour et, selon les cas, on peut tout aussi bien avoir recours à des moteurs hydrauliques ou à des machines à vapeur. Mais, comme les funiculaires se trouvent généralement dans des pays de montagnes, qu'ils ont alors pour objectif de conduire les voyageurs et les marchandises à un point d'accès généralement difficile et que, par suite, l'installation, au sommet, d'une usine à vapeur ou hydraulique présentera le plus souvent des difficultés locales multiples, on trouvera ordinairement avantage à alimenter le tambour-moteur par un transport de force, en plaçant l'usine en un point d'accès commode et où, ce qui n'est pas rare dans les montagnes, on disposera d'une chute hydraulique suffisante.

Dans ces conditions on aura recours, soit à un transport de force par courant continu, soit à un transport de force par cou-

[1] Le système doit être appliqué, à Hambourg, à une ligne de 21 kilomètres de longueur.

rants triphasés. Les deux systèmes conviennent parfaitement dans le cas envisagé.

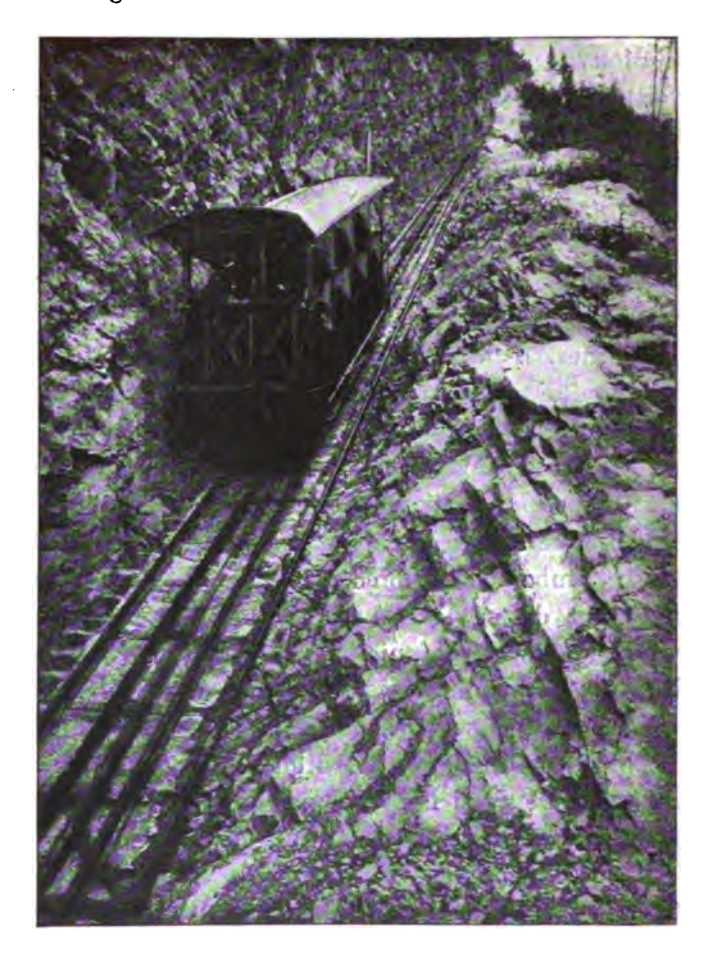


Fig. 485. — Funiculaire électrique du Bürgenstock (voie courante).

Pour diminuer la puissance nécessaire au fonctionnement d'un funiculaire, on établit la ligne avec deux câbles, de telle façon qu'une voiture descendante puisse équilibrer une voiture montante. Au milieu de la ligne une voie d'évitement permet le croi-

sement des voitures. On conçoit même qu'en chargeant la voiture descendante, on pourrait supprimer toute intervention du tambour



Fig. 486. — Funiculaire électrique du Bürgenstock (voie d'évitement pour croisement des voitures).

moteur. Ce procédé, que l'on applique dans les funiculaires à contre-poids d'eau, est tout à fait avantageux quand on dispose, au sommet de la ligne, d'un petit cours d'eau permettant de

charger, sans dépenses, les caisses d'eau de la voiture descendante. Mais ce cas est plutôt exceptionnel.

Avec le double câble la puissance de débit d'un funiculaire se trouve mathématiquement limitée, puisqu'il ne peut pas y avoir plus de deux voitures sur la ligne : une montante et une descendante. C'est un inconvénient sérieux et c'est pour cette raison que l'on a dû (notamment à Lyon-Saint-Just) transformer des funiculaires en chemins de fer à crémaillère, avec traction électrique.

Avec les funiculaires on aborde fréquemment des rampes de 50 à 60 p. 100. On conçoit quelle attention on doit donner, dans ce cas, à la question du freinage. Sur certaines lignes on a recours à des freins à sabot, agissant sur les rails eux-mêmes. Mais le mieux est encore d'adjoindre à la voie une crémaillère et de munir les voitures de roues dentées, avec freins à gorge, identiques à ceux des chemins de fer à crémaillère.

Les funiculaires électriques sont maintenant assez nombreux quoique cependant, quand les rampes le permettent, on ait une tendance bien légitime à leur substituer la traction par crémaillère.

Comme *funiculaires avec courants continus*, nous citerons ceux du Burgenstock et du Stanserhorn (Suisse).

Le premier franchit, avec une rampe moyenne de 53,3 p. 100, une différence de niveau de 440 mètres. La longueur du tracé est, suivant l'horizontale, de 827 mètres et, suivant la rampe, de 936 mètres.

La voie est à l'écartement d'un mètre (fig. 485); elle est constituée par des rails rigides, pesant 22 kg. 5 le mètre courant et par une crémaillère double, système Abt, servant pour le freinage. Au milieu de la ligne se trouve une voie d'évitement pour le croisement des voitures (fig. 486). Les voitures en forme d'escaliers sont à deux essieux avec un faux essieu intermédiaire pour l'engrènement avec la crémaillère. Ce faux essieu est muni d'un frein à poulie qui peut être mis en action soit à la main, soit automatiquement, en cas de rupture du câble.

La force motrice provient d'une usine hydraulique, située sur la rivière l'Aa, à 4 kilomètres du funiculaire, et est transmise à la station du sommet, sous forme de courant continu. L'usine génératrice comprend 2 groupes de 2 dynamos Thury, de 20 kilowatts chaque, tournant à 800 tours et produisant, alors, une tension de 800 volts. Dans chaque groupe les 2 dynamos sont mises en série et donnent dès lors, dans la ligne, une tension de 1 600 volts.

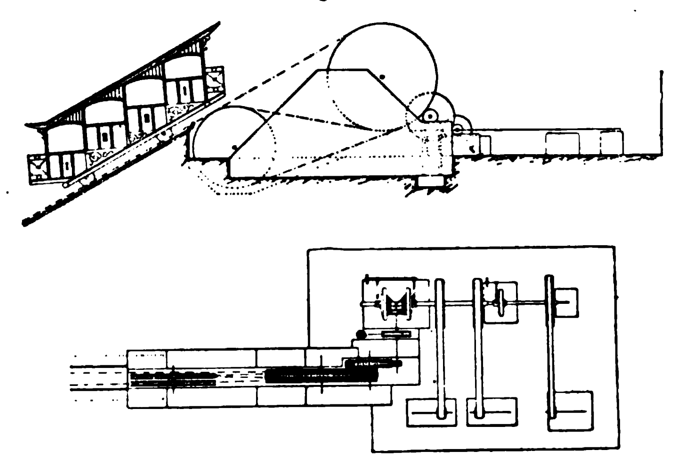


Fig. 487. — Mode d'enroulement du câble de traction.

Pour actionner le câble on dispose dans la station du funiculaire de 2 dynamos semblables, mettant en mouvement, par courroie, un arbre sur lequel sont montés deux engrenages coniques qui, par un système d'embrayages, peuvent mettre en mouvement, l'un ou l'autre, un pignon de transmission. Dans un cas l'enroulement du câble se fait dans un certain sens, et dans l'autre cas il a lieu en sens inverse.

La figure 487 montre comment le mouvement du pignon est communiqué au tambour d'enroulement, dont le diamètre est de 4 mètres.

Le câble ne fait que passer sur le tambour d'enroulement, attendu qu'à une voiture montante correspond une voiture des-

cendante. Le tambour est à double gorge, le câble revenant dans la 2e gorge après avoir passé sur une poulie de renvoi de 3 mètres de diamètre.

Au moment de la mise en route, une voiture est au bas de la ligne et l'autre au sommet. Les moteurs doivent alors développer l'effort maximum, ayant à remonter à la fois une voiture et le câble. Mais au fur et à mesure que la voiture du bas monte et que par suite l'autre descend, il y a tendance à l'équilibre et à partir d'un certain moment (environ les deux tiers de la course) le travail devient négatif. On doit alors s'opposer à l'accélération de la vitesse, ce que l'on obtient aisément en agissant, par un frein, sur une poulie fixée au pignon moteur.

Une seule des dynamos réceptrices suffit pour le service du funiculaire; l'autre sert pour l'éclairage d'un grand hôtel installé au sommet de la montagne. Pour pouvoir isoler cette dernière quand le funiculaire ne marche pas, on a monté entre les réceptrices et les génératrices un fil neutre, comme dans une distribution à 3 fils.

La montée rapide de la ligne de transport de force rend particulièrement nécessaire la protection des réceptrices et des génératrices par des parafoudres. Ceux-ci sont à pointes et sont placés en avant d'une bobine d'induction combinée avec un condensateur à grande surface, dont une des armatures est à la terre. Les faibles décharges sont arrêtées par le condensateur. Quant aux violentes décharges, une partie seulement, en raison de la grande résistance inductive de la bobine, va au condensateur. La presque totalité du fluide s'écoule, dans ce cas, par le parafoudre.

Le *funiculaire électrique du Stanserhorn* présente cette particularité qu'il est à trois échelons, avec trois câbles distincts et trois stations motrices. Ce sectionnement de la ligne se justifie par la longueur du tracé (3,600 km.) et par la variété du profil en long (fig. 488). La dernière partie, qui est la plus abrupte, comporte des rampes de 40 à 62 p. 100.

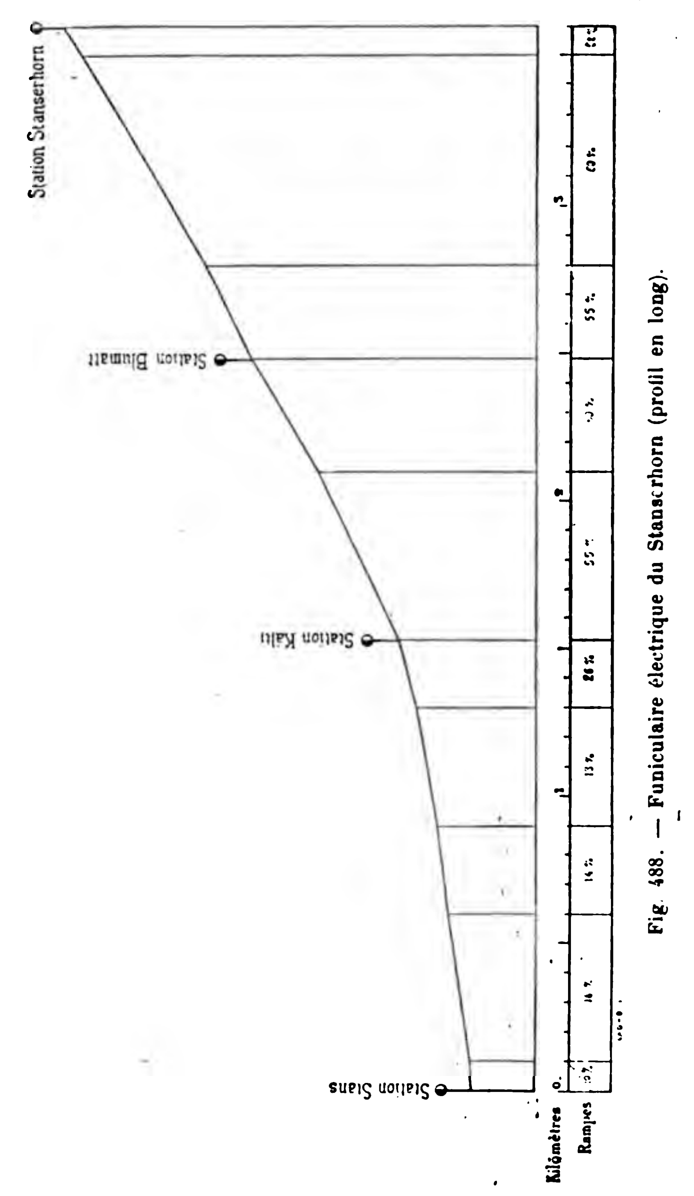


Fig. 488. — Funiculaire électrique du Stanserhorn (profil en long).

La ligne est à voie d'un mètre, *sans crémaillère*, les construc-

teurs s'étant justement donné comme programme de renoncer à ce complément ordinaire des funiculaires. Les caisses des voitures sont en forme d'escalier et comprennent 4 compartiments de 8 places. Pour pouvoir arrêter rapidement la voiture, on dispose de freins à mâchoires, prenant appui sur les rails et pouvant être mis en action soit à la main, soit automatiquement, quand le câble se rompt. Un 3e frein est à la disposition de l'agent chargé d'accompagner la voiture. De multiples essais faits avec ces freins à mâchoires en ont démontré l'efficacité et justifié, pour cette installation spéciale, la suppression de la crémaillère.



Fig. 489. — Funiculaire du Stanserhorn (dynamo actionnant le câble).

Dans les trois stations de force motrice, l'enroulement du câble et sa mise en mouvement s'effectuent comme dans la station du Burgenstock. Mais on se contente d'une seule dynamo motrice, la station n'ayant pas à assurer de services accessoires. Cette dynamo, dont la puissance est de 40 kilowatts, marche à 1 600 volts (fig. 489). Le courant est produit dans une usine hydro-électrique située sur la rivière l'Aa.

Il existe maintenant un assez grand nombre de funiculaires avec courants triphasés (et aussi avec courants biphasés). Nous citerons notamment le funiculaire de Bienne-Leubringen (Suisse), celui de Gurten, près Berne, celui du Sonnenberg, près Lucerne. Ces divers funiculaires ont été équipés par la maison Brown-Boveri, qui a tant contribué au développement de la traction par courants triphasés. Les moteurs à courants triphasés présentent pour

l'actionnement des funiculaires des avantages au moins aussi marqués que des moteurs à courant continu, ne s'emballant pas, récupérant facilement de l'énergie et étant d'un entretien peu dispendieux. Ils peuvent recevoir du courant à haute tension (3 000 volts à Berne) et s'ils sont à basse tension, tout en étant alimenté par un transport de force, ils ne nécessitent pour l'utilisation du courant que l'emploi de transformateurs statiques.

Plates-formes continues à plusieurs vitesses. — Lorsque le trafic est très intense, l'exploitation par train peut devenir insuffisante. Les arrêts, les démarrages et l'intervalle de temps nécessaire pour assurer, par des signaux, la sécurité de la circulation imposent un certain espacement des trains (au moins une minute et demie) et limitent par conséquent l'utilisation de la ligne. Dans les grandes artères, ou lorsqu'il s'agit de transporter des agglomérations anormales, comme dans une exposition, il serait intéressant de pouvoir arriver jusqu'au *train continu*, les voitures se suivant sans interruption dans les gares.

Mais on se heurte, dans ce cas, à une difficulté bien évidente, celle de l'embarquement et du débarquement des voyageurs pendant la marche.

Divers systèmes ont été proposés pour résoudre ce problème. M. Thévenet Le Boul a préconisé, en particulier, l'emploi d'embarcadères rotatifs. Supposons un grand plateau circulaire horizontal, tournant autour d'un axe creux. Si l'on considère les différents points d'un même rayon, allant du centre à la circonférence, leur vitesse sera variable. Si, par exemple, la vitesse est, à la périphérie, de 4 mètres à la seconde (14,4 km. à l'heure) elle ne sera que de 2 mètres au milieu du rayon et vers le centre elle sera à peu près nulle. En sorte qu'un voyageur arrivant par l'arbre creux pourra, sens difficulté, monter sur le plateau, et, en se dirigeant dans le sens d'un rayon, il augmentra peu à peu sa vitesse tangentielle jusqu'à la valeur de 4 mètres

à la seconde. Si, à ce moment, il trouve devant lui des wagons circulant à la même vitesse et dans le même sens, ces wagons seront immobiles par rapport à lui et il pourra profiter de cet instant pour monter dans les voitures.

Ce système n'a pas été appliqué pratiquement et si nous en faisons mention, c'est plutôt pour montrer que l'embarquement des voyageurs dans un train en marche n'est en somme qu'une question de vitesses relatives.

La seule solution qui ait eu la sanction de la pratique est celle des *plates-formes continues à plusieurs vitesses* et dont le fonctionnement est le suivant :

Imaginons, à côté d'un trottoir fixe, une plate-forme marchant à la vitesse de 5 kilomètres à l'heure. L'expérience prouve que le passage du trottoir sur la plate-forme et vice versa, peut se faire sans difficulté, surtout si l'on munit la plate-forme de barres d'appui que peuvent saisir les personnes peu agiles. Or, supposons, à côté de la première plate-forme, une seconde plate-forme marchant à 8 kilomètres à l'heure. Par rapport à la première, elle ne marchera qu'à 4 kilomètres et par conséquent il sera tout aussi facile de passer d'une plate-forme à l'autre, que du trottoir fixe à la plate-forme. Voici donc le voyageur transporté à la vitesse de 8 kilomètres à l'heure. Mais on peut imaginer une 3e et même une 4e plate-forme marchant respectivement à 12 et 16 kilomètres à l'heure. Par son passage sur ces dernières, le voyageur se trouvera ainsi transporté à une vitesse déjà très convenable, sans compter que l'on pourrait encore l'augmenter en ajoutant d'autres plates-formes.

La descente s'effectuera par un procédé inverse, le voyageur diminuant, chaque fois, sa vitesse de 4 kilomètres.

Pour qu'un tel système marche sans discontinuité, le tracé doit comporter une voie montante, une voix descendante et une boucle à chaque terminus. De plus, chaque plate-forme ne peut être constituée rigidement, puisqu'elle doit passer dans des courbes. Elle

doit présenter des articulations et avoir son plancher disposé pour se prêter à ces articulations.

La mise en mouvement de plates-formes mobiles peut être effectuée soit à l'aide de moteurs électriques, montés sous les plates-formes et qui se déplacent avec elles, soit par des moteurs fixes poussant les plates-formes par engrenages ou par friction. Avec des moteurs fixes on facilite beaucoup la surveillance et on diminue le poids des masses à déplacer.

Plate-forme de l'Exposition de Chicago. — La plate-forme de l'Exposition de Chicago est du premier type. Imaginons une série

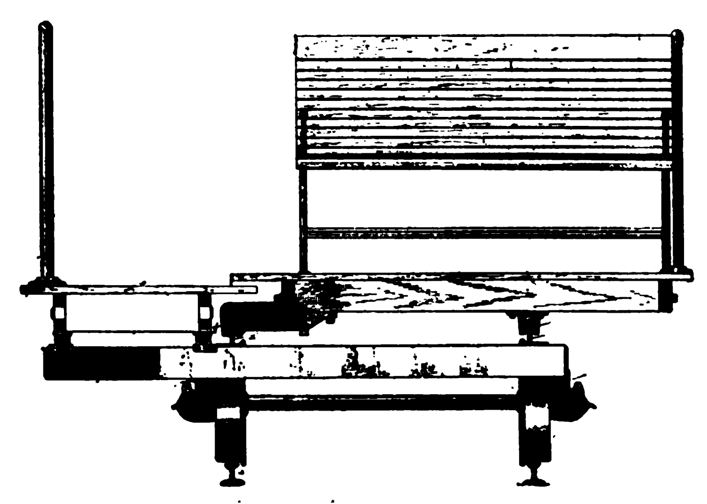


Fig. 490. — Plate-forme à deux vitesses de l'Exposition de Chicago (coupe transversale).

de trucks ordinaires de tramways, mis bout à bout et, sur ces trucks, une plate-forme continue, reposant par deux bandes de tôle sur le sommet des roues des trucks. La vitesse de déplacement des roues au sommet étant le double de celle au centre, la plate-forme marchera avec une vitesse double de celle du truck. Si donc sur le truck même, mais en porte-à-faux, on monte un

plancher continu on aura réalisé deux plates-formes mobiles, avec des vitesses dans le rapport de 1 à 2 (fig. 490). Il suffira d'installer le long de la plate-forme en porte-à-faux un trottoir continu pour permettre, selon les principes indiqués plus haut, l'embarquement et le débarquement des voyageurs.

La plate-forme de l'Exposition de Chicago avait été installée sur

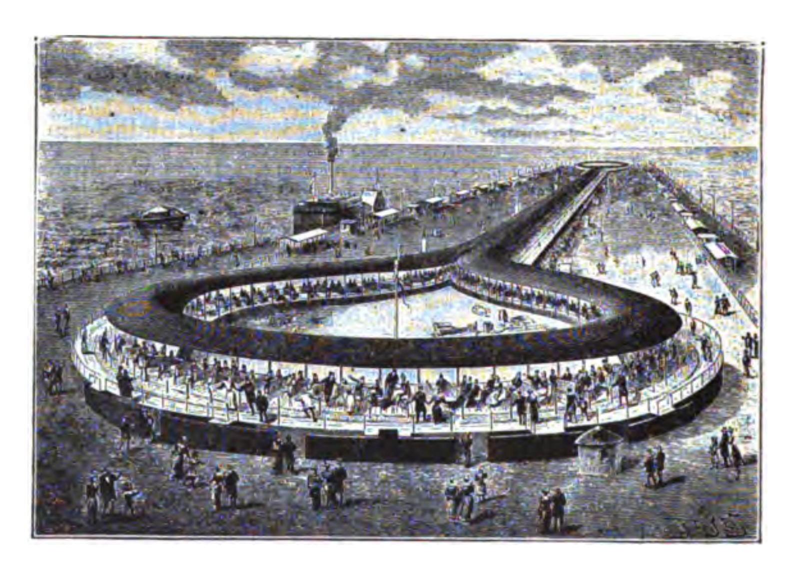


Fig. 491. — Plate-forme de l'Exposition de Chicago (vue générale).

une jetée du lac Michigan (fig. 491) et servait moins comme moyen de transport que comme système de promenade. La voie, dont l'écartement était de 1,25 m., était de niveau et formait un circuit fermé de 1310 mètres de longueur. Pour garnir toute cette étendue on a employé 350 trucks à quatre roues. Tous les 35 trucks, on a installé un truck moteur, comportant deux moteurs de 12 kilowatts, attaquant les essieux par engrenages et des caisses à ballast ayant pour objet d'augmenter l'adhérence.

Le plancher en porte-à-faux avait 0,80 m. de largeur et circulait à la vitesse des trucks, soit 4,8 km. à l'heure. La plate-

forme à grande vitesse marchait, par conséquent, à 9,6 km. Elle avait 1,82 m. de largeur et était munie de bancs transversaux sur 1,45 m. Il restait donc, en dehors des bancs, une petite zone de 0,37 m. sur laquelle les voyageurs pouvaient mettre le pied en passant de la petite à la grande vitesse. Ils avaient d'ailleurs la possibilité, pour effectuer ce passage, de se tenir aux dossiers des



Fig. 492. — Plate-forme de l'exposition de Chicago (trotteur fixe et planchers mobiles).

bancs (fig. 492). De même, pour monter sur la première plate-forme, ils disposaient de barres verticales très nombreuses, fixées sur le plancher de la plate-forme.

Le courant électrique était distribué par un fil aérien régnant sous les trucks et sur lequel venaient frotter des roulettes de trolley reliées électriquement aux trucks moteurs.

Le poids de la plate-forme (grande et petite vitesse) était de 470 tonnes; en charge (avec 5 600 personnes) le poids atteignait 860 tonnes. En moyenne, il était de 600 tonnes. La puissance

nécessaire pour maintenir le mouvement de la plate-forme ne dépassait pas 80 à 90 kilowatts[1].

La *Multiple speed and traction Company* avait proposé d'appliquer le système à l'une des rues (State Street), de Chicago. On

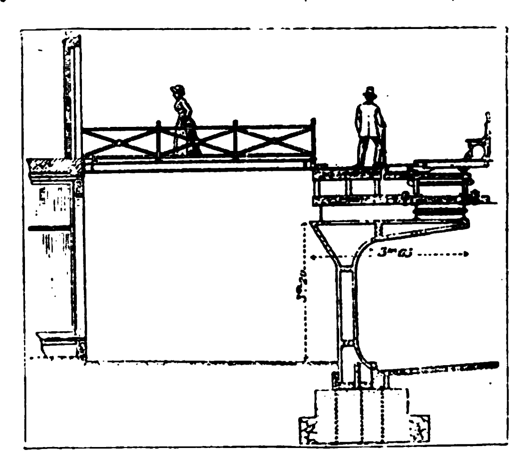


Fig. 493. — Plate-forme de la Multiple Speed and Traction Company.

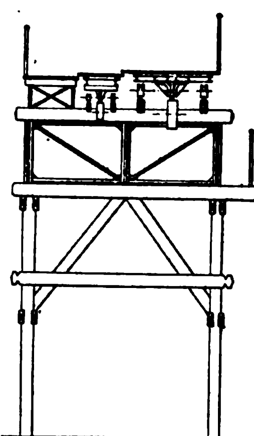
aurait installé près de la bordure des trottoirs des piliers supportant un plancher d'embarquement et deux plates-formes mobiles et d'autre part on eût relié le plancher aux maisons riveraines, par des passerelles (fig. 493). Mais ce projet, qui ne manque pas d'un certain intérêt, n'a pas eu de suite.

Plate-forme de l'Exposition de 1900. — Dans la plate-forme de l'Exposition de 1900 on a cherché à supprimer quelques-uns des inconvénients de la plate-forme de Chicago, principalement en n'adoptant que des moteurs fixes, faciles à surveiller. On pouvait, d'autre part, reprocher à la plate-forme américaine les frottements produits dans les courbes par les tôles de la partie à grande vitesse reposant sur les roues. Il était d'autant plus nécessaire, à l'Exposition de 1900, d'améliorer le roulement que la

[1] *La Nature*, 11 novembre 1893.

plate-forme prévue, présentait une longueur de 3 370 mètres.

Le tracé de la plate-forme avait été combiné par l'auteur du présent ouvrage de manière à former comme la seconde voie d'un chemin de fer électrique circulaire, réunissant l'esplanade des Invalides au Champ-de-Mars. Le chemin de fer tournait dans le sens des aiguilles d'une montre et la plate-forme dans le sens inverse.



Les dispositions mécaniques de la plate-forme d'abord étudiées par M. Blot ont été beaucoup améliorées par MM. Guyenet et de

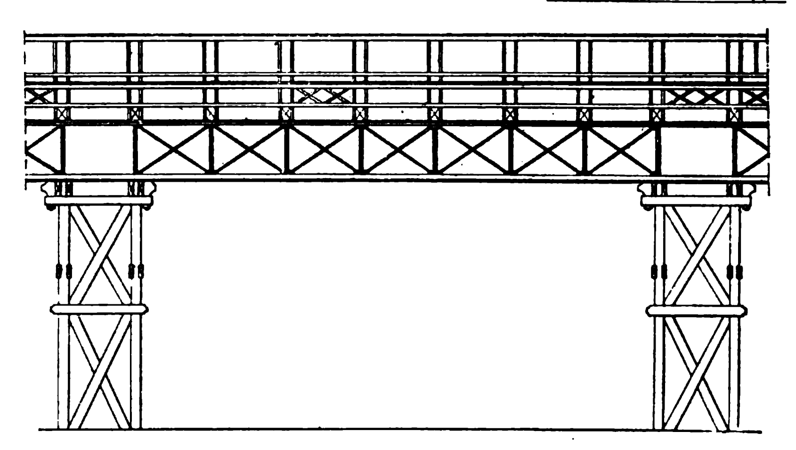


Fig. 494 et 495. — Plate-forme de l'Exposition universelle de Paris, en 1900 (coupe transversale et élévation).

Mocomble. Quant à la distribution et à l'alimentation électriques elles ont fait, de la part de la Cie des Transports Electriques de l'Exposition l'objet d'une étude approfondie, et les dispositions prises à ce point de vue, ont contribué, dans une large mesure, à assurer le succès de cet ingénieux système de transport. Ainsi a été donnée une nouvelle preuve de l'aptitude merveilleuse de

l'électricité à se prêter aux sujétions les plus diverses que présente le problème si varié des modes de transport.

La plate-forme de l'Exposition de 1900 était constamment en viaduc [1] (fig. 494 et 495). En coupe transversale elle présentait un



Fig. 496. — Plate-forme en alignement droit.

trottoir fixe de 1,10 m. de largeur, une plate-forme à petite vitesse de 0,90 m. de largeur et une plate-forme à vitesse double de 2 mètres de largeur. Ces trois parties n'étaient pas dans un même plan horizontal. Elles étaient en escalier avec des différences de niveau d'une dizaine de centimètres. Tous les 200 mètres environ

[1] Ce viaduc, constitué par des poutres à treillis largement ajourées, permettait l'accès de toute l'infrastructure. Il était muni, au niveau des semelles inférieures, d'un platelage et on avait, en outre, installé extérieurement une galerie continue de circulation.

des élargissements du trottoir fixe, accessibles par des escaliers,



Fig. 497. — Plate-forme dans une courbe.

formaient des gares où les voyageurs pouvaient plus facilement embarquer et débarquer.

La plate-forme à grande vitesse n'était pas munie de bancs, comme celle de Chicago. On avait craint que les personnes mal-

habiles puissent heurter ces bancs en passant de la petite à la grande vitesse. Mais on avait multiplié les barres d'appui, aussi bien sur la petite que sur la grande vitesse, afin de faciliter l'embarquement et le débarquement des voyageurs (fig. 496 et 497).

Chacune des plates-formes mobiles reposait, par des galets, sur une voie de roulement, en rails de 9 kilogrammes au mètre courant (écartement 0,90) pour la plate-forme petite vitesse et de 12 kilogrammes (écartement 1,20 m.) pour la plate-forme grande vitesse. Les rails avaient été posés sur longrines en bois pour donner plus de douceur au roulement.

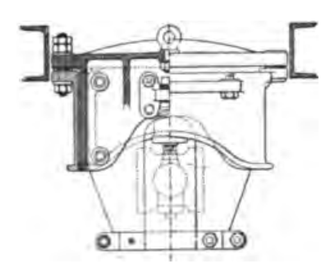


Fig. 498. — Boite à roue.

Afin de pouvoir changer, au besoin, une roue en cours de route, on avait fixé les plaques de garde à un socle mobile en fonte, reposant sur un cadre à glissière, sur lequel il était maintenu par des boulons (fig. 498). Les boulons une fois dévissés on pouvait, à l'aide d'un crochet, enlever d'un seul coup le socle, la roue et ses plaques de garde.

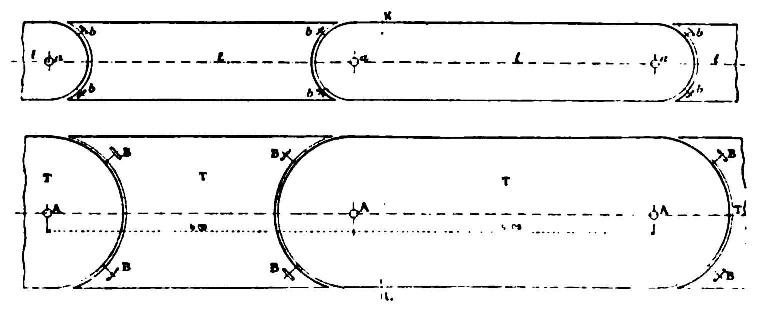


Fig. 499. — Trucks à roues et trucks sans roues.

Chaque plate-forme était constituée par une succession de trucks à roues et de trucks sans roues (fig. 499). Les premiers reposaient sur quatre roues et étaient terminés par une partie circulaire. Les trucks sans roues épousaient les parties existantes entre

deux trucks sans roues et étaient maintenus, d'une part, par la poutre axiale sur laquelle les moteurs agissaient par friction, d'autre part par des *galopins*, c'est-à-dire par des petits galets fixés sur les trucks à roues.

Sous chaque ligne de trucks, grande et petite vitesse, régnait une *poutre axiale articulée*. Cette poutre, très résistante, était terminée inférieurement par une tête de rail venant reposer, tous les six mètres, sur un galet monté sur ressorts. Tous les 24 mètres

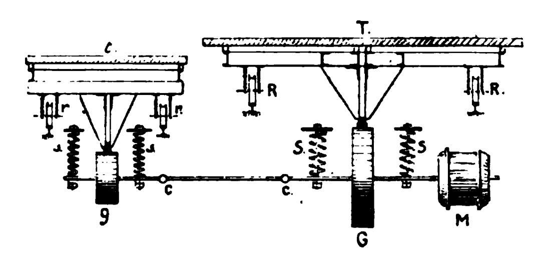


Fig. 500. — Mode d'entrainement des plates-formes.

environ, le galet était moteur et le même arbre moteur actionnait à la fois la grande et la petite vitesse (fig. 500); mais le diamètre des galets était dans le rapport de 2 à 1, ce qui maintenait rigoureusement la vitesse de la grande plate-forme à une valeur double de celle de la petite plate-forme.

En raison du montage des galets sur ressorts, l'arbre de transmission commun ne pouvait être rigide; il était en trois parties, réunies par deux joints à la Cardan.

Les ressorts des galets n'avaient pas seulement pour objet d'adoucir le roulement; ils permettaient d'appuyer plus ou moins le galet sur la poutre axiale, ce qui augmentait l'adhérence et diminuait la charge sur les roues porteuses. Celles-ci ne supportaient guère que les 4/10 du poids des trucks.

La poutre axiale était articulée tous les 4 mètres et les points d'articulation correspondaient aux centres des extrémités circulaires des trucks. Grâce à ces articulations le passage de la plate-

forme dans des courbes de 60 mètres de rayon se faisait avec la

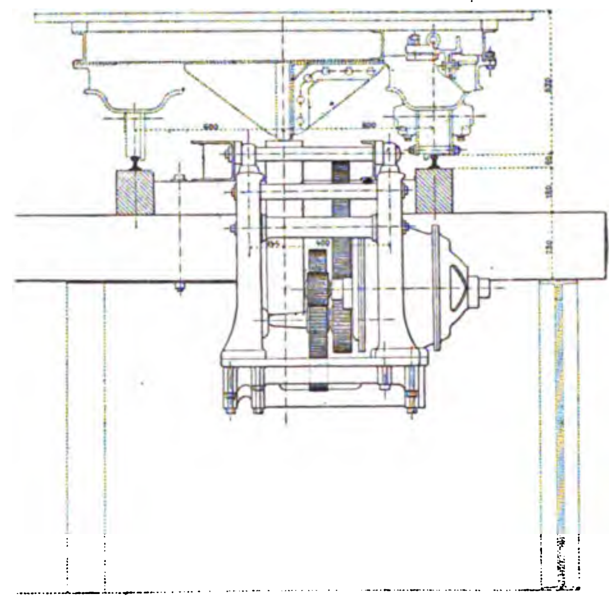


Fig. 501. — Mode d'entraînement des galets moteurs.

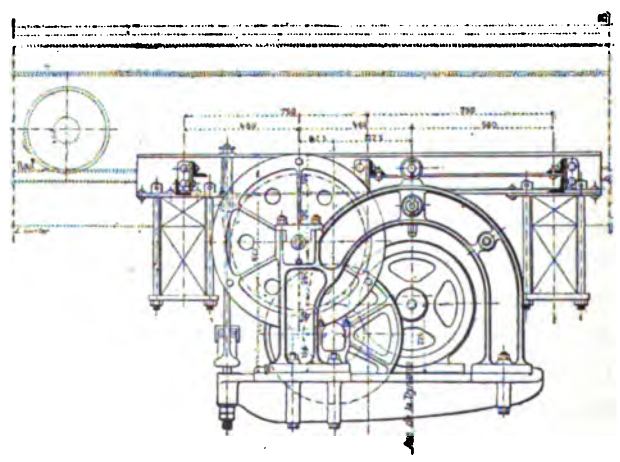


Fig. 502. — Vue longitudinale.

plus grande facilité. D'autre part les articulations disposaient,

dans le sens longitudinal, d'un certain jeu, permettant d'aborder des rampes de 3 millimètres par mètre.

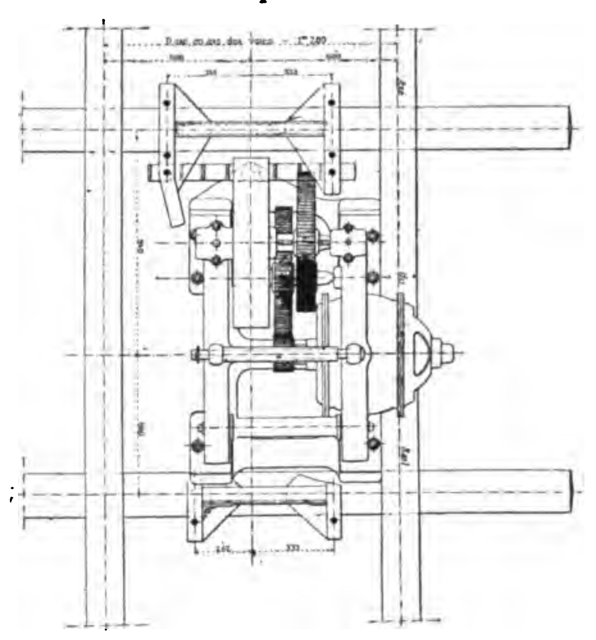


Fig. 503. — Plan.

Les figures 501, 502 et 503 montrent comment les galets

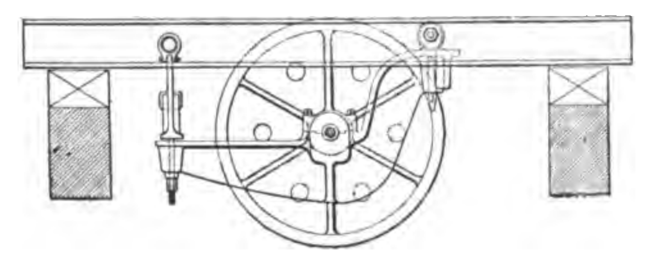


Fig. 504. — Galet non moteur.

moteurs étaient mis en mouvement. Galets, moteurs et engrenages étaient montés sur un même bâti fixé à un châssis, d'une

part par un axe articulé, d'autre part par des crochets avec menottes soutenant un ressort qu'un boulon de réglage pouvait bander plus ou moins. C'est à l'aide de ce boulon que l'on réglait l'adhérence du galet sur la poutre axiale. Le pignon du moteur était en cuir et, de cette façon, on avait beaucoup réduit le bruit de la transmission.

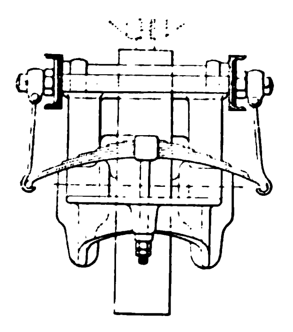


Fig. 505. — Ressort de réglage du galet non moteur.

Les galets non moteurs (fig. 504 et 505) étaient également à bâti pivotant et ils étaient plus ou moins pressés sur la poutre axiale par un boulon, bandant plus ou moins le ressort de suspension.

Comme on l'a vu plus haut, les ressorts des galets aussi bien moteurs que non-moteurs étaient réglés de façon à supporter les 6/10 du poids des trucks.

Les moteurs, au nombre de 173, étaient des moteurs à courant

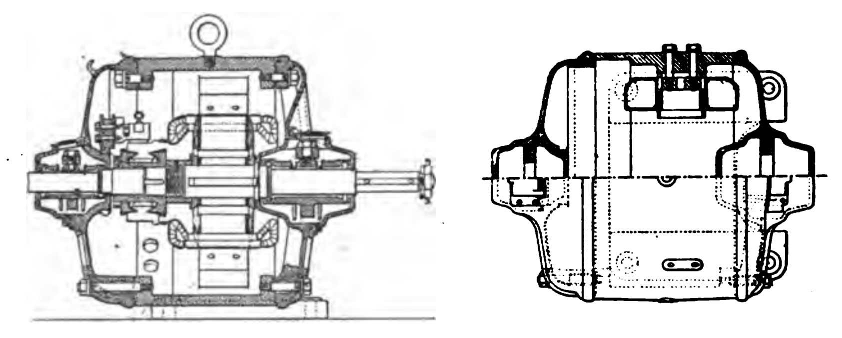


Fig. 506. — Moteur (plan et coupe transversale).

continu 500 volts, de 5 chevaux, à excitation en série [1], (fig. 50 et 507). Leur vitesse de rotation (naturellement assez élevée, (725 tours) avait motivé la transmission, par double réduction, que nous avons indiquée plus haut.

[1] Ces moteurs avaient été fournis partie par la Cie Westinghouse, partie par la Société d'Applications Industrielles.

Le courant électrique provenait de l'usine à courants triphasés des Moulineaux (chemin de fer de l'Ouest). Ce courant, dont la tension était de 5 000 volts, arrivait dans une sous-station de transformation, comprenant des commutatrices pour le chemin de fer

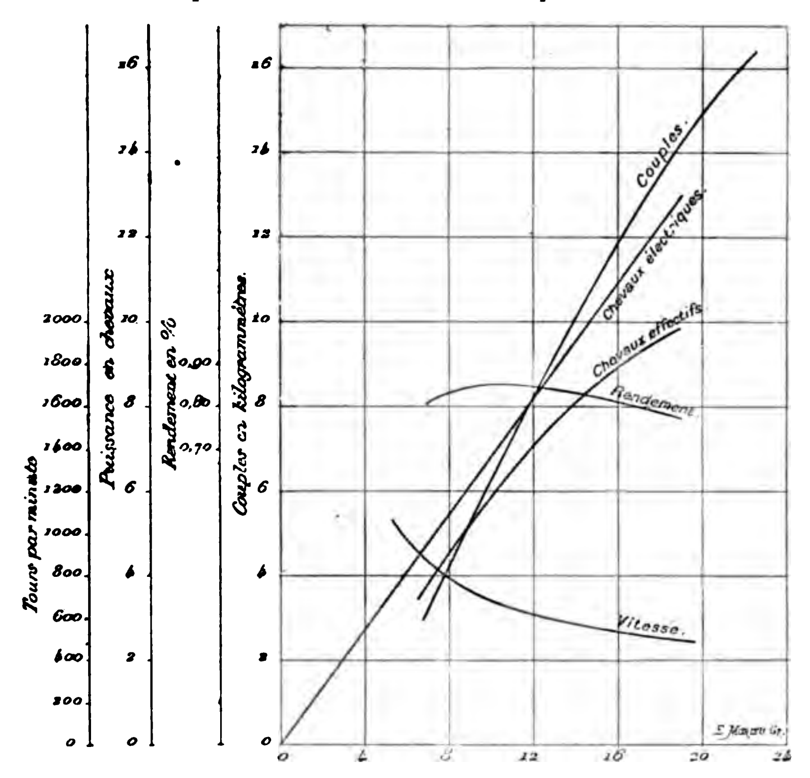


Fig. 507. — Caractéristique des moteurs.

et deux transformateurs tournants de 600 kilowatts (dont un de réserve) pour la plate-forme.

Ces transformateurs tournants se composaient d'un moteur asynchrone à 5 000 volts actionnant une génératrice à courant continu, susceptible de donner 1 100 ampères, sous 550 volts, et pouvant marcher soit à excitation séparée, soit comme machine shunt.

Pour démarrer on avait recours à l'excitation séparée. L'exci-

tatrice spéciale se composait d'une dynamo actionnée par un moteur asynchrone de 30 kilowatts, à 200 volts, et que l'on mettait en route en le mettant, pour le démarrage sous 100 volts :

Le courant continu produit par ce groupe était tout d'abord envoyé dans l'induit de la dynamo de 600 kilowatts, qui fonctionnait alors comme moteur et entraînait le grand moteur asynchrone. Lorsque celui tournait à la vitesse du synchonisme, on le branchait sur les 5000 volts et on coupait le courant de l'excitatrice. Celle-ci intervenait alors uniquement pour assurer l'excitation de la grande dynamo et il suffisait, pour faire varier cette excitation dans de grandes limites, d'agir sur l'excitation de l'excitatrice, c'est-à-dire sur un rhéostat très peu important.

Dans ces conditions il n'y avait pour ainsi dire pas de pertes d'énergie. Le voltage de la grande dynamo se trouvait, dès le début, réduit à une centaine de volts, en même temps que l'intensité se trouvait très élevée, circonstance éminemment favorable pour obtenir un couple énergique, comme nous l'avons expliqué, en parlant du fonctionnement général des moteurs et comme on pourra s'en rendre compte très facilement, par la seule inspection de la caractéristique des moteurs employés. Pendant quelques secondes le courant circulait dans les moteurs, qui prenaient une charge croissante et, quand l'intensité avait atteint une valeur suffisante, un démarrage général s'effectuait.

Le démarrage une fois effectué, on pouvait arrêter l'excitatrice et prendre le courant d'excitation sur la grande dynamo ellemême.

Ce système si remarquable de démarrage, et dont M. Mazen, ingénieur à la C[ie] des Chemins de fer de l'Ouest, avait vivement recommandé l'emploi, a simplifié extraordinairement l'aménagement intérieur de la sous-station. Il a permis de supprimer d'énormes rhéostats et on a obtenu ce résultat réellement digne d'être cité, de ne pas consommer plus d'énergie pour le démarrage que pour la marche normale.

Ajoutons que, pour placer les machines de la sous-station dans des conditions de fonctionnement encore plus favorables, on avait profité de ce que les moteurs de la plate-forme étaient également répartis de part et d'autre de la sous-station pour les alimenter en deux groupes, montés en série. Ce mode de montage qui ne devait servir que pendant la période du démarrage a été ensuite conservé, parce que l'on n'a pas jugé utile d'augmenter la vitesse au delà de celle correspondant à la mise en série des deux groupes de moteurs.

La plate-forme pesait 1 800 tonnes[1]. Son démarrage prenait environ 900 ampères à 200 volts; en marche, la consommation était d'environ 350 ampères à 440 volts. Lorsque la plate-forme était en charge la puissance absorbée augmentait très peu. C'est ainsi qu'avec des surcharges de 1 000 à 1 200 tonnes, correspondant à environ 15 000 voyageurs, on n'a observé qu'un accroissement de puissance de 25 kilowatts.

Bien que l'on eut pu réaliser des vitesses de 6 kilomètres pour la petite plate-forme et de 12 pour la grande on n'a pas dépassé 3,7 km. pour la première et 7,4 km. pour la seconde. L'expérience a montré que de telles vitesses suffisaient parfaitement et qu'il y aurait eu d'ailleurs des inconvénients sérieux à les dépasser, en raison des affluences énormes qui se produisaient à certains moments.

Grâce à l'ensemble des dispositions prises le fonctionnement de la plate-forme a toujours été parfait. Complètement terminée dès le début même de l'Exposition, elle a tourné jusqu'au dernier jour, ayant parcouru 190 000 kilomètres et transporté 7 millions de voyageurs.

Une application aussi réussie a démontré nettement la praticabilité d'un tel système. Sa capacité de transport est d'autre

[1] Poids d'un truck à roues, grande vitesse, 1 800 kilogrammes. Poids d'un truck sans roues, 800 kilogrammes. Ensemble 2 600 kilogrammes. Par mètre courant, 325 kilogrammes. — Poids d'un truck à roues petite vitesse, 700 kilogrammes. Poids d'un truck sans roues 500 kilogrammes. Ensemble 1 200 kilogrammes. Par mètre courant, 150 kilogrammes.

part bien supérieure à celle d'un chemin de fer et il y aura lieu de le prendre en considération toutes les fois que l'on aura à transporter de grandes foules et que la question de la vitesse ne se posera pas d'une façon prédominante. Et encore pourrait-on, par l'emploi de 3 à 4 plates-formes, obtenir une vitesse déjà très raisonnable. Mais le système s'en trouverait évidemment un peu compliqué.

Chemins de fer de mines. — La traction électrique des wagons dans les mines offre des avantages évidents. On peut même dire que c'est à peu près le seul système de traction pratique, pour ce genre de transport, les locomotives à vapeur ayant le grave inconvénient de vicier l'air des galeries et celles à air comprimé étant peu pratiques, en raison de la nécessité de renouveler souvent la provision d'air et occasionnant, d'autre part, des dépenses d'entretien élevées.

Les chemins de fer de mines ont généralement une voie à très faible écartement (0,50 m. à 0,75 m); de plus, le peu d'espace dont on dispose dans le sens vertical conduit à n'employer qu'un matériel moteur très ramassé.

Comme les wagons remorqués sont exclusivement des wagons à matériaux, il est justifié d'avoir recours, pour la traction des trains à des locomotives. Celles-ci sont généralement à deux moteurs, dont la suspension et le mode d'engrènement se font comme dans un tramway et que l'on manœuvre à l'aide d'un contrôleur ordinaire, avec couplage série-parallèle. Les moteurs, les roues et les essieux sont pour ainsi dire coiffés par un couvercle en fonte, formant châssis et, grâce à ce blindage, la locomotive peut passer sans inconvénients dans les galeries, sans craindre la chute de matériaux, provenant d'éboulis ou de dépôts mal équilibrés. Le centre de gravité étant en outre très bas, la machine conserve une bonne stabilité, malgré les imperfections de pose de la voie.

La distribution du courant (courant continu) a lieu par un fil



Vue par l'avant.



Vue par l'arrière.

Fig. 508. — Locomotive minière à trolley.

de cuivre placé sur l'un des côtés de la galerie et qui est généralement protégé par une gouttière en bois. Un trolley latéral, soit à

roulette avec perche (fig. 508), soit à cadre articulé (fig. 509), amène le courant aux moteurs. Le retour se fait par les rails. La tension du courant dans la ligne aérienne est le plus souvent inférieure à 500 volts, le développement des galeries ne motivant pas une tension aussi élevée. On se tient, ordinairement, aux environs de 2 à 300 volts.

La puissance des moteurs est généralement d'une dizaine de

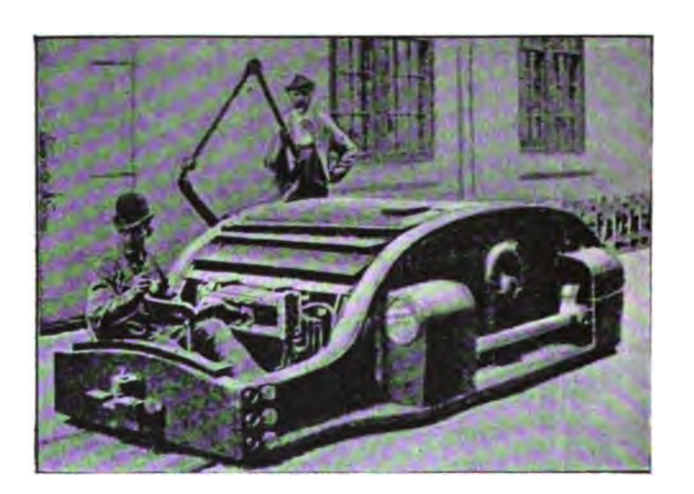


Fig. 509. — Locomotive minière avec cadre articulé.

chevaux et la vitesse de circulation des trains dépasse rarement 10 à 12 kilomètres.

Afin de faciliter les démarrages on munit les locomotives de 4 sablières, à raison d'une par essieu. Les freins n'offrent rien de spécial ; toutefois on ne fait usage que de freins à main.

Avec des locomotives à trolley il se produit au passage de la roulette, sur les joints du fil aérien et des supports des étincelles qui, dans des mines grisouteuses, pourraient avoir des inconvénients graves. Dans ce cas on pourra faire usage de locomotives à accumulateurs, mais le rendement économique tout en étant

encore plus satisfaisant que dans le cas des chevaux, sera bien moins élevé.

L'emploi des locomotrices électriques dans les mines s'est beaucoup répandu pendant ces dernières années. Le fait s'explique, non seulement par les avantages si remarquables de ces machines, mais aussi par la tendance de plus en plus grande que l'on a à munir les mines d'une distribution d'énergie électrique, soit pour actionner des perforatrices, soit pour faire tourner des ventilateurs, sans parler bien entendu de l'éclairage.

La C[ie] Thomson-Houston, dans son Bulletin n° 62, signale qu'à Forest-City (charbon), la substitution de la traction électrique à la traction par mules a augmenté la production de 25 p. 100 et réduit les frais de transport de 43 p. 100. Les locomotives employées dans la mine pèsent 10 tonnes et remorquent des trains de 10 wagons, pesant en tout 44 tonnes. La vitesse est de 12 kilomètres à l'heure.

Dans les houillères de Green-Ridge, les locomotives, du poids de 6,5 t. remorquent 8 vagons et font, sur un parcours de 1 000 mètres, 20 voyages par jour aller et retour. L'installation, ayant coûté 38 500 francs, donne lieu à une dépense, pour amortissement, de 1 900 francs par an et de 9,50 fr. par jour de travail (à raison de 200 jours par an).

Les dépenses journalières atteignent dès lors :

Mécanicien de l'usine	8,75	francs.
Mécanicien de la locomotive	8,75	—
Aides	8	—
Réparations	3,80	—
Huile, graisse, chiffons	1	—
Amortissement	9.50	—
Total . . .	39,80	francs.

Le poids du charbon journellement transporté étant de 288 tonnes, le prix de revient du transport, par tonne, est de 0,138 fr.



Fig. 510. — Locomotive de mine, système Westinghouse

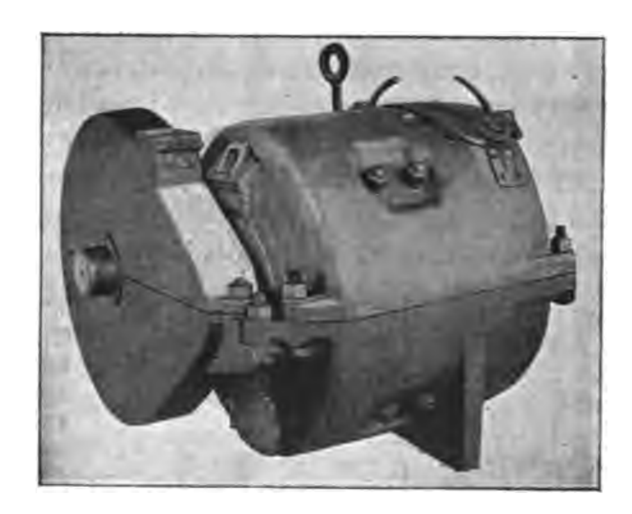


Fig. 511. — Moteur Westinghouse pour locomotive de mine.

Avec les mules, on dépensait par jour 103 francs et, par tonne, 0,357 fr.

On a donc réalisé, avec l'électricité, une économie de 61 p. 100.



Fig. 512. — Vue latérale.

A Forest-City la tonne, avec locomotive électrique, revient à

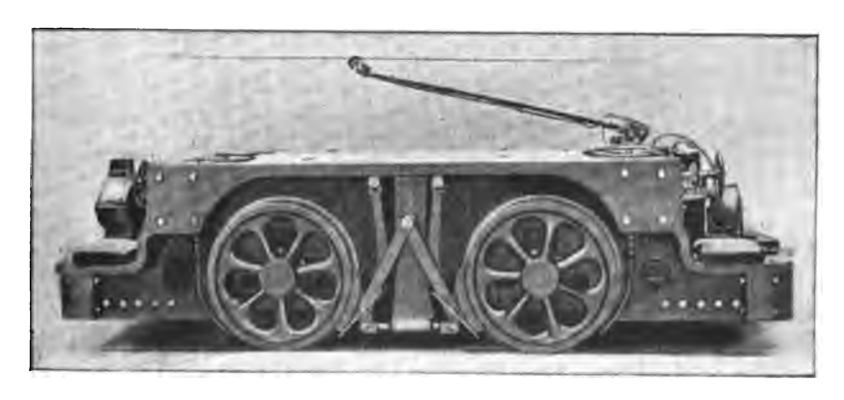


Fig. 513. — Vue de côté, le châssis latéral étant enlevé.

0,11 fr. alors qu'elle coûtait, avec les mules, 0,416 fr., d'où une économie de 72 p. 100.

Enfin aux mines de Tiercelet, où l'on emploie des locomotives

électriques à 2 moteurs de 40 chevaux (poids 11 500 kg.) on a constaté une économie de près des 2/3 sur les anciens prix de halage (0,13 fr. par tonne de minerai et par kilomètre, au lieu de 0,35 fr.).

La C[ie] Westinghouse a poussé très loin, de son côté, l'étude des locomotrices minières (fig. 510) ayant combiné tout un matériel spécial, s'adaptant parfaitement au gabarit particulièrement réduit de telles machines. La figure 511 montre son type usuel de moteur qui est à simple réduction, avec excitation en série, et se manœuvre par un contrôleur placé à l'avant, comme l'indique la fig. 510. Les formes ramassées des machines (fig. 512), la possibilité de dégager rapidement les parties roulantes et les organes moteurs (fig. 513) ont assuré à ce matériel spécial un succès légitime. Ainsi donc, grâce encore à l'électricité, le problème des transports dans les mines se trouve élucidé aujourd'hui d'une façon complète, la locomotive minière électrique réunissant toutes les qualités désirables, en l'espèce : la sécurité, la souplesse et l'économie.

CHAPITRE XI

EXPLOITATION ET DÉPENSES

Exploitation avec la traction électrique. Exploitation dans le cas des lignes métropolitaines et suburbaines. Matériel roulant. Quais. Escaliers et ascenseurs. Distribution des billets et tarifs. Arrêts dans les stations. Vitesse commerciale. Signaux. Circulation des trains et terminus. Dépôts et ateliers. Dépenses de premiér établissement. Dépenses d'exploitation. Coefficient d'exploitation.

Les chemins de fer électriques ne donnent pas lieu à une exploitation spéciale, et les principes généraux qui régissent cette partie importante de l'industrie des chemins de fer leur sont tout à fait applicables. L'expérience prouve, d'ailleurs, que le personnel se familiarise très rapidement avec les sujétions particulières à la traction électrique et qu'il n'y a même aucune difficulté à combiner, sur une ligne déterminée, une traction mixte, c'est-à-dire en partie à l'électricité et en partie à la vapeur.

La distribution de l'électricité le long des voies est, au début, un sujet de préoccupation assez grand pour les exploitants, et l'appréhension du personnel pour une force invisible et qu'il sait s'être manifestée, dans certaines installations, par des accidents mortels, est assez légitime. Mais cette appréhension ne dure pas; d'abord parce que les agents se rendent compte que les chocs que peut occasionner tout contact avec les courants usuels (5 à 600 volts) sont inoffensifs et ensuite que, peu à peu, ils se font une idée plus nette et plus juste de l'électricité, de sa distribution et de ses diverses manifestations.

Si, d'une manière générale, l'électricité ne modifie pas sensiblement les conditions d'exploitation d'une entreprise de chemins de fer, elle est, en revanche, susceptible d'apporter à l'exploitation des éléments nouveaux, permettant d'accroître encore le coefficient d'utilisation des réseaux existants.

C'est ainsi, notamment, que le problème des grandes vitesses s'élucide, avec elle, d'une façon singulière, soit que l'on ait recours aux procédés ordinaires, c'est-à-dire à des organes moteurs circulant sur deux files de rails, soit que, plus hardiment, on se lance dans la traction par monorail.

En fait, grâce à l'électricité, des vitesses de 100 kilomètres à l'heure peuvent être considérées, aujourd'hui, comme parfaitement réalisables.

Et grâce à l'électricité, également, on peut aborder des vitesses aussi élevées avec sécurité, attendu que le cantonnement des trains tels que permettent de le réaliser les systèmes actuels de « bloquage », devient combinable avec un cantonnement électrique, c'est-à-dire avec l'alimentation successive des sections du block-system, de telle façon que le courant soit interrompu automatiquement dans toute section bloquée.

Les avantages généraux de l'électricité sont tels que, sur bien des chemins de fer on pourrait, dès à présent, envisager sa substitution à la vapeur. Il n'est pas d'exemple de lignes qui, après transformation, n'aient donné des augmentations de trafic importantes (souvent de 50 à 60 p. 100). Certes il faut également faire intervenir la question des dépenses et ne pas négliger les charges supplémentaires d'amortissement. Mais les compagnies exploitantes jouissent, presque toutes, de concessions de longue durée, permettant de répartir l'amortissement sur un grand nombre d'années.

On peut affirmer qu'à l'heure actuelle un grand nombre de lignes à vapeur gagneraient à être transformées à l'électricité. Peut-être objectera-t-on que le problème laisse encore certains

points douteux, pour ce qui concerne les très grandes lignes. Mais l'hésitation n'est plus permise pour des lignes à grand trafic de moyenne longueur et surtout pour des lignes suburbaines, parce que, dans ce cas, on peut procéder d'après des exemples réels, en mettant à profit les résultats d'installations analogues, fonctionnant d'une façon parfaite et dont la liste s'accroît chaque jour dans des proportions tout à fait frappantes.

Exploitation dans le cas des lignes métropolitaines et suburbaines. — Les lignes métropolitaines ont pris, dans ces dernières années, grâce à l'électricité, un développement considérable. Elles ont nécessité, naturellement, l'application de méthodes d'exploitation nouvelles. Il faut, pour cette raison, leur consacrer un examen spécial, faisant toutefois observer que ces méthodes concernent, d'une manière générale, des exploitations *intensives*, et qu'elles peuvent être appliquées, par suite, aussi bien à des lignes *suburbaines* à grand débit qu'à des lignes uniquement *métropolitaines*.

Une des conditions principales à réaliser est d'assurer l'évacuation rapide des voyageurs et, à ce sujet, il y a lieu de considérer le mouvement des voyageurs dans les wagons, sur les quais, et, des quais jusqu'aux portes de sortie sur la voie publique.

Matériel roulant. — La disposition intérieure des wagons doit faciliter la circulation dans le sens longitudinal et, dans ce but, il paraît préférable de disposer les sièges par rangées de deux, perpendiculairement à l'axe longitudinal de la voiture, en ménageant entre elles un couloir central. Quelquefois, pour des raisons de gabarit, on a désaxé le couloir, la largeur des wagons ne permettant pas d'installer un couloir central. Mais le gabarit normal (et nous verrons plus loin qu'un tel gabarit devrait toujours être la règle, en matière d'exploitations urbaines), convient tout à fait pour une répartition symétrique des places, attendu qu'en comp-

tant 0,80 m. pour le couloir central, 0,45 m. comme longueur de banquette par place et 0,10 m. pour l'épaisseur des parois de la voiture, on atteint une largeur totale de 2,80 m., encore inférieure de quelques centimètres au matériel en usage sur les grandes lignes.

Si, à tous égards, le matériel à bogies s'impose pour des lignes métropolitaines, il y aurait des inconvénients à employer des voitures trop longues, parce que les voyageurs mettraient alors trop de temps pour gagner les portes de sortie. L'inconvénient serait surtout sensible pour des voitures où, comme en Amérique, on aurait installé les portes aux extrémités de la voiture.

Nous reviendrons, dans un instant, sur la situation des portes de sortie. Disons seulement, pour en finir avec la disposition intérieure des sièges, qu'il y a intérêt à ce que le couloir central n'ait pas dans toute sa longueur une largeur uniforme. Dans la partie voisine des portes on lui donnera une largeur plus grande que dans la partie centrale, afin de former comme un canal à section croissante. Cet évasement facilitera beaucoup l'évacuation des voyageurs.

En Angleterre et en Amérique on a réalisé une telle disposition en mettant dans la partie centrale de la voiture des sièges transversaux et, dans les deux parties extrêmes, des banquettes adossées aux parois de la voiture. Mais les banquettes adossées offrent des inconvénients sérieux, parce que les voyageurs sortants et entrants risquent de marcher sur les pieds des voyageurs assis et parce que ces derniers, qui ont le dos appuyé contre les parois de la voiture, ressentent plus facilement les courants d'air.

Avec des banquettes transversales, il suffit, pour augmenter la longueur du couloir central, de réduire les places à une de chaque côté. On gagnera ainsi 0,90 m. et la largeur du couloir augmentera d'autant.

En Angleterre et en Amérique on place volontiers les portes

aux extrémités des voitures, et on les fait déboucher sur une plate-forme munie d'une grille de fermeture. Un agent se tient sur l'une des plates-formes et ouvre ou ferme simultanément la plate-forme de sa voiture et celle de la voiture la plus rapprochée de lui. Cette disposition est avantageuse, en ce sens qu'elle réduit au minimum le déplacement des agents. Mais elle donne un écoulement des voyageurs un peu lent. A ce dernier point de vue des portes latérales, s'ouvrant largement, sont préférables. Mais elles seraient peu à leur place sur des voitures devant circuler à air libre, en raison de la grande quantité d'air froid qui, à chaque arrêt, s'engouffrerait pendant l'hiver, dans les voitures.

Nous avons dit qu'il n'y avait pas intérêt, même avec du matériel à bogies, à employer des voitures trop longues.

Il faut bien remarquer en effet, que l'objet à remplir n'est plus le même que dans le cas d'un train à long parcours et pour lequel il est indispensable de donner au voyageur beaucoup de confortable. Avant tout il faut, dans le cas d'un métropolitain, faciliter la circulation des voyageurs. Et c'est en se plaçant encore à ce point de vue qu'il est recommandable de rapprocher le plus possible les voitures, en donnant aux tampons le minimum de saillie. Sur quelques lignes on a même remplacé les tampons par une saillie centrale aplatie, disposition qui se justifie d'autant plus que, dans un service métropolitain, les accrochages et décrochages sont peu fréquents. Le rapprochement des voitures a, dans ces conditions, un double intérêt : d'abord il permet de mieux utiliser les longueurs des quais ; ensuite il diminue l'espace que les voyageurs ont à parcourir sur les quais, pour atteindre les portes des voitures.

L'expérience prouve qu'il n'y a réellement pas intérêt à dépasser pour les voitures une longueur de 13 à 14 mètres. Quant à la largeur nous avons déjà dit qu'au point de vue de la répartition des places, il fallait se rapprocher, autant que possible, du gabarit

normal. Pour certains métropolitains des considérations momentanées ont fait adopter des largeurs de 2,30 m. à 2,40 m. Mais on en sent gravement tous les inconvénients, les trains devenant rapidement insuffisants pendant les heures de grand trafic. Or, forcément, une ligne métropolitaine est soumise à des à-coups de circulation correspondant aux moments des plus forts déplacements de la population. Pendant ces heures particulièrement chargées il serait d'un intérêt évident de pouvoir disposer d'un matériel qui, par le simple effet de son élargissement, présenterait, en places assises, une capacité supérieure d'au moins un tiers à ce que donne un matériel rétréci. La caractéristique générale d'une ligne métropolitaine est d'ailleurs un service intensif et, dans un cas semblable, on devrait avoir tendance à augmenter, plutôt qu'à diminuer la largeur du matériel usuel. Non seulement le public y trouverait son intérêt, car les grandes « vagues » journalières du matin et du soir auraient ainsi un écoulement plus facile, mais on ferait, au point de vue de l'exploitation, une économie notable sur le personnel des trains, puisque les mêmes agents pourraient surveiller un bien plus grand nombre de voyageurs.

Quais. — On emploie dans les exploitations métropolitaines des quais centraux ou des quais latéraux. Dans le premier cas les voies, avant d'aborder la station, doivent s'écarter par une courbe et une contre-courbe, de manière à présenter dans la station même un écartement tel que le double quai puisse être établi entre la voie montante et la voie descendante.

Avec les quais latéraux les voies pénètrent, au contraire, dans la station, sans déviation, et avec le même entre-voie que dans la partie courante.

Cette dernière disposition est bien préférable, d'abord parce que les trains n'ont pas à démarrer en courbe et en contre-courbe, et ensuite parce que, dans tous les cas où la ligne est en souter-

rain ou en viaduc — ce qui est tout à fait fréquent pour une exploitation métropolitaine — la déviation des voies compliquerait sérieusement les travaux de l'infrastructure. Elle obligerait, également, à avoir une zone inutilisée à l'extrémité des quais, sur toute la longueur où le rapprochement des voies doit ensuite s'effectuer.

On peut dire qu'avec le quai central la surveillance et le contrôle des voyageurs sont plus faciles. Mais, sur les quelques lignes américaines où le quai central a été adopté, on a dû, pour éviter des encombrements, diviser le quai en deux par une barrière longitudinale.

En somme les quais latéraux paraissent préférables et c'est à une disposition de cette nature que l'on a eu recours sur l'Elevated de New-York, le Métropolitain de Berlin, le Métropolitain de Paris, etc...

Il faut bien se garder, d'ailleurs, d'employer un système mixte, car alors les voyageurs devraient, suivant l'emplacement des quais, descendre d'un côté ou de l'autre, par rapport au sens de la marche de trains.

Il ne peut s'agir pour une exploitation métropolitaine que de *quais élevés* et le desideratum serait de pouvoir les établir exactement au niveau du plancher des wagons. Mais il faut tenir compte du jeu des ressorts de suspension des voitures ; de plus, si la station est en courbe, on doit s'arranger pour que le quai s'avance jusqu'à l'aplomb des parties les moins saillantes du matériel ce qui nécessite, en revanche, une pénétration de la bordure sous les parties en saillie. Cette pénétration n'est possible qu'autant qu'une certaine dénivellation existe entre le niveau du quai et celui du plancher des voitures.

L'expérience prouve qu'une dénivellation de 15 à 16 centimètres n'est nullement gênante pour la circulation. Mais on ne devra pas, toutefois, quand on le pourra, hésiter à la réduire.

Les quais se trouvent donc, par rapport au niveau des rails,

à une hauteur de 0,80 m. à 1 mètre. En cas de bousculade les voyageurs qui tomberaient sur la voie pourraient se blesser sérieusement, surtout si le rail électrique était du côté du quai : aussi, quand la ligne est à quai latéral, devra-t-on placer le troisième rail dans l'entrevoie. Il ne sera pas d'ailleurs inutile de le protéger par des madriers ou des planches non seulement en raison d'un envahissement possible de la voie, par le public, en cas d'affluence ou de panique, mais aussi pour faciliter la circulation du personnel.

La largeur des quais peut être assez réduite, car il ne s'agit pas, comme pour un quai de chemin de fer ordinaire, de prévoir un stationnement assez prolongé des voyageurs et il n'y a pas à compter avec l'encombrement et la gêne qu'occasionne la manipulation des bagages. Un quai de métropolitain est plutôt un quai de passage et l'on ne doit pas avoir, pour objectif, de lui donner des dimensions telles qu'il puisse recevoir tous les voyageurs se présentant pour prendre le chemin de fer en cas de retard important dans l'arrivée des trains. Il faut alors arrêter les voyageurs à l'entrée même de la station, en suspendant momentanément la distribution des billets. Dans ces conditions une largeur d'environ 3 mètres est suffisante, surtout si l'on peut obtenir que, dans les voitures, une des portes serve pour l'entrée et l'autre pour la sortie des voyageurs.

La longueur des quais dépend, évidemment, de l'intensité du service que l'on veut réaliser. Mais, comme la caractéristique d'un chemin de fer à grand débit est l'accroissement continu du trafic, on fera bien de prévoir des quais sensiblement plus longs que ceux qui sont strictement nécessaires pour le service de début. Pour le Métropolitain de Paris on a adopté une longueur de quais de 75 mètres. Une telle longueur paraît, aujourd'hui, insuffisante, et pour des lignes à trafic aussi intense il ne faudrait pas craindre d'atteindre 90 et même 100 mètres de longueur.

Avec des quais de faible longueur on peut installer les accès

aux extrémités, et dans ce cas il sera tout à fait intéressant d'avoir un accès pour l'entrée et un pour la sortie. Mais une telle disposition oblige encore les voyageurs à parcourir, en moyenne, la moitié de la longueur du quai. L'inconvénient est surtout grave pour les voyageurs arrivant, attendu qu'ils débarquent en « flot » et qu'il y a un intérêt de premier ordre à assurer, à ce moment, le dégagement rapide des quais. Aussi serait-il préférable de disposer la ou les sorties vers le milieu des quais.

Escaliers et ascenseurs. — Étant donné que les gares sont rarement au niveau du sol et qu'elles sont le plus souvent établies soit en viaduc, soit en souterrain, des dispositions spéciales sont à prendre pour assurer l'écoulement des voyageurs entre les quais et le niveau du sol.

Si le chemin de fer est à grande profondeur, des ascenseurs sont inévitables. Ils ont un double inconvénient : d'abord ils coûtent très cher pour leur surveillance, leur entretien et leur fonctionnement (près de 400 000 francs par an sur le Central London). Ensuite ils ralentissent un peu la vitesse d'écoulement des voyageurs, car ils ne sont mis en route qu'après que ceux-ci ont pris le temps de s'y installer. Enfin comme un ascenseur a une capacité assez limitée (60 à 80 personnes) il faut, dans les gares importantes, prévoir tout un « jeu » d'ascenseurs, ce qui augmente considérablement les dépenses de premier établissement. Néanmoins, dès que le tunnel se trouve à une profondeur un peu importante, on ne peut réellement pas imposer au public la fatigue d'escalader de 100 à 150 marches et l'absence d'ascenseurs serait une cause sérieuse de diminution pour le trafic. Aussi toutes les gares du Central London (une vingtaine de mètres de profondeur) ont-elles été munies d'ascenseurs et bien qu'elles soient également accessibles par des escaliers, tous les voyageurs préfèrent monter et descendre par l'ascenseur.

D'ailleurs plus la gare est profonde et plus le ralentissement de l'écoulement des voyageurs, dû à l'ascenseur, s'atténue, car l'ascenseur s'élève et descend beaucoup plus vite que ne le ferait un voyageur s'astreignant à passer par les escaliers.

Pour éviter l'intermittence de fonctionnement des ascenseurs on a proposé de relier les gares au sol par des *tapis roulants*, c'est-à-dire par des courroies sans fin, en rampe d'un tiers, et sur lesquels les voyageurs montent un à un. Il y avait à l'Exposition de Paris, en 1900, un grand nombre de tapis roulants et l'expérience a prouvé qu'ils fonctionnaient d'une façon très satisfaisante, ne consommant, d'ailleurs, que peu d'électricité par voyageur monté. Il ne serait pas du tout déraisonnable d'appliquer un tel système à des gares souterraines. Pour des gares en viaduc à grand débit, les tapis roulants sont certainement tout indiqués et le public les préférerait sûrement à des escaliers.

Quoi qu'il en soit, il est clair que l'installation d'ascenseurs ou d'autres systèmes analogues de transport est une complication sérieuse pour l'exploitation ; aussi dans certains réseaux de métropolitains, notamment à Paris, a-t-on préféré établir les gares le plus près possible du sol, mais en s'astreignant, alors, à avoir un profil en long très accidenté, car la présence de nombreux égouts non susceptibles d'être déviés oblige, en beaucoup de points, à descendre à une profondeur assez grande. A Londres, si la profondeur de la ligne est considérable on a pu, en revanche, réaliser un profil en long excellent, les démarrages se faisant en pente et les arrêts en rampe. Le Métropolitain de Paris a, au contraire, un profil en long excessivement dur et la consommation d'énergie par tonne-kilomètre y est sensiblement plus élevée qu'à Londres. Il ne faudrait donc pas croire que l'on a pu y supprimer les ascenseurs sans perdre quelque chose par ailleurs. Tout compte fait, cependant, l'exploitation sans ascenseurs est encore plus économique et si l'on ne considère que l'intérêt de l'exploitant, il est préférable de n'avoir, comme systèmes d'accès, que des escaliers.

D'ailleurs on peut s'arranger pour que ces escaliers soient plus facilement acceptables pour le voyageur en les coupant par des paliers sur lesquels se trouveront les guichets pour la distribution des billets. Ce système a, de plus, l'avantage de réduire au minimum l'encombrement des accès eux-mêmes sur la voie publique.

Distribution des billets et tarifs. — Le mode de distribution et de contrôle des billets ont sur la vitesse d'écoulement des voyageurs dans les gares une influence qui n'est pas négligeable.

Toutes choses étant égales, d'ailleurs, on conçoit que l'une et l'autre opération seront singulièrement facilitées par ce fait qu'il n'y aura qu'une classe unique et, comme conséquence, qu'un type unique de billets.

C'est le système qui a été adopté en Angleterre et en Amérique. Dans ce cas le contrôle des billets est des plus faciles. On a le plus souvent recours au *chopper-box*, c'est-à-dire que le voyageur, après avoir pris son billet, se contente, en passant devant le contrôleur, de le jeter dans un bocal en verre. Le contrôleur manœuvre en même temps un levier qui laisse tomber le billet dans une caisse placée sous le bocal. Si, par crainte de fraudes ultérieures, on veut procéder à l'oblitération des billets on peut, comme sur l'Elevated, employer un cylindre oblitérateur, qui perfore le billet, au moment où le contrôleur le fait tomber dans la caisse. Un tel système est particulièrement agréable pour le voyageur, qui n'a plus, ensuite, à être ennuyé par les agents des quais ou des trains.

Sur certaines stations on a même été plus loin et l'on se contente, au fur et à mesure que les voyageurs ont payé le prix de leur place, de les faire passer par un tourniquet enregistreur qui donne, à la fin de la journée, le nombre de voyageurs ayant pénétré sur les quais. On peut supprimer ainsi l'agent du chopper-

box. Mais le tourniquet prête à la fraude, deux personnes pouvant, assez facilement, passer en même temps.

Dans le but d'économiser également un agent à la sortie on a muni quelques stations de l'Elevated d'un *tourniquet de sortie*. Ce tourniquet ne tourne que dans un seul sens et, par conséquent, il est impossible de s'en servir pour pénétrer sur les quais.

Ces systèmes d'exploitation, remarquablement simples, ne sont malheureusement applicables qu'avec un tarif unique. Sur les métropolitains où, comme à Paris, il y a trois natures de billets, le contrôle à la main devient à peu près obligatoire et il doit être encore complété par un contrôle en cours de route, afin que vérification soit faite que les voyageurs sont bien dans la classe correspondant à leur billet.

La distribution des billets doit être effectuée avec la plus grande rapidité possible. On la facilite par la vente de carnets de billets contenant de 10 à 20 billets. Dans certaines exploitations on fabrique les billets dans les stations même, à l'aide d'appareils fonctionnant également comme enregistreurs. Mais un tel système n'est nullement obligatoire et la délivrance de billets par rouleaux, comme en Angleterre, est plus simple et tout aussi sûre.

Les prix des places varient sur les métropolitains selon les pays. En Amérique, le tarif est uniformément de 25 cents, correspondant à environ 25 centimes. En Angleterre on paye deux penny et ce tarif a même fait donner au Central London le nom populaire de « two penny tube ». Sur le métropolitain de Berlin on paye de 0,125 fr. à 0,475 fr. selon la classe et la distance[1]. Enfin, à Paris les tarifs sont 0,25 fr. en 1re classe, 0,15 fr. en 2e classe et 0,20 fr. pour un billet aller et retour de 2e classe délivré avant 9 heures du matin.

Arrêts dans les stations. — Comme il est extrêmement impor-

[1] Il y a deux classes et trois zones. Tarifs (en pfennigs), 0,10, 0,15, 0,20 en 2e classe, et 0,20, 0,25, 0,30 en 2e classe.

tant d'atteindre, sur une ligne à grand trafic, une vitesse commerciale aussi élevée que possible, on doit chercher à réduire au minimum la durée des arrêts dans les gares.

L'expérience prouve qu'avec un matériel bien approprié, facilitant, comme on l'a dit plus haut, la circulation intérieure dans les voitures, ainsi que l'embarquement et le débarquement des voyageurs, on peut réduire les arrêts à *une dizaine de secondes*. Ce chiffre est extrêmement faible, mais il peut être néanmoins très souvent réalisé, le public acceptant assez facilement une certaine bousculade pour entrer dans les voitures et en sortir.

Simultanément il est nécessaire que les agents procèdent avec la plus grande rapidité à la fermeture et à l'ouverture des portes et que le signal de départ puisse être donné sans hésitation ni perte d'un instant, dès que le train est prêt à partir.

Nous avons vu que, pour obtenir ce double résultat, on avait fait déboucher en Amérique et en Angleterre, les portes des voitures sur des plates-formes placées aux extrémités des voitures et que l'on avait chargé de la manœuvre des portes un agent se tenant sur l'une des plates-formes et commandant à la fois sa plate-forme et celle de la voiture la plus rapprochée. Le même agent descend rapidement sur le quai, sur le Central London et, faisant face à la voiture de tête, il étend le bras perpendiculairement au quai, dès que le service de ses deux plates-formes est terminé. Quand tous les agents ont le bras placé dans cette direction, le chef de train donne le signal du départ.

En Amérique, les agents ne descendent même pas sur le quai. Ils se contentent de crier le nom de la station, d'ouvrir les portes et de tirer sur une sonnerie qui avertit l'agent de la voiture qui les précède. Toutefois le conducteur ne sonne que lorsque l'agent de la voiture qui suit la sienne a indiqué également, par la sonnerie, qu'il était prêt. Le signal se transmet ainsi, consécutivement, depuis la queue jusqu'à la tête du train et c'est à ce moment là, seulement, que le signal de départ est donné.

A Paris, c'est l'agent du quai qui indique, par un coup de sifflet, que le service des portes est terminé. Ce signal est répété par le chef de train, qui n'est autre que l'agent de la première voiture.

Vitesse commerciale. — La vitesse commerciale d'un train est la vitesse moyenne en kilomètres à l'heure de ce train, arrêts compris.

Elle a une importance considérable sur les résultats finaux de l'exploitation parce que si, par un procédé quelconque, on peut augmenter cette vitesse seulement de 2 à 3 kilomètres, on augmente la capacité journalière de transport du matériel de 10 à 15 p. 100, ce qui correspond à une augmentation analogue de la recette brute, alors que les frais supplémentaires d'exploitation ne croissent que dans une proportion beaucoup moins forte. Ils se réduisent, en effet, pour la plus grande partie, à ceux qui correspondent à l'accroissement de la consommation de courant, les frais de personnel et les frais généraux restant les mêmes.

C'est pour augmenter la vitesse commerciale que l'on a donné aux moteurs une puissance de plus en plus grande et que l'on est arrivé, finalement, au *multiple unit system*, qui permet de transformer dans un train, en automotrice, autant de voitures que l'on veut. Dans ces conditions les démarrages se font avec l'accélération maxima et, même avec des stations éloignées seulement de 5 à 600 mètres, on peut atteindre une vitesse maxima de 40 à 50 kilomètres.

Il n'y a que dans des cas bien spéciaux où l'on peut, pour une exploitation métropolitaine, se priver des avantages si précieux du *multiple unit system*. C'est ainsi que s'effectue la traction sur l'Elevated de New-York, l'Elevated de Brooklyn, l'Elevated de Boston, etc. A Londres (Central London) où la traction se faisait à l'aide de locomotives on a tout changé pour le *multiple unit* et l'on doit, de même, l'appliquer à Berlin.

Grâce au *multiple unit*, on peut réaliser aisément des vitesses commerciales de 25 à 26 kilomètres à l'heure, soit un gain de 4 à 5 kilomètres par rapport aux vitesses que l'on obtient avec les systèmes ordinaires.

Pour pouvoir réaliser une vitesse commerciale élevée, il ne suffit pas seulement de démarrer vite, il faut aussi s'arrêter très rapidement ; mais l'électricité n'intervient pas, dans ce cas, d'une façon directe, les freinages s'effectuant généralement avec l'*air comprimé* et ce système permettant d'arrêter un train avec la rapidité maxima, c'est-à-dire celle correspondant à l'accélération retardatrice limite qui peut être supportée par les voyageurs. L'expérience prouve que l'on peut parfaitement arrêter un train marchant à 40 kilomètres à l'heure, en 10 à 12 secondes. Mais, naturellement, un arrêt aussi rapide, avec la nécessité pour la première voiture de ne pas dépasser l'extrémité du quai, ne peut être obtenu que par des agents bien exercés.

Signaux. — Doit-on, sur une ligne à trafic intense, exploiter *à vue* ou avec des *signaux?*

Si l'on veut se poser une question semblable, il faut d'abord se demander si, sur une ligne métropolitaine, on peut exploiter sans signaux.

Il est permis de répondre par l'affirmative, mais seulement pour des cas spéciaux. C'est ainsi que les signaux ne sont réellement pas indispensables sur un « elevated » où le wattman peut toujours, malgré les courbes de la voie, apercevoir suffisamment à temps, un train dont il s'approcherait par trop près.

Sur l'Elevated de New-York, où l'on avait tout d'abord appliqué le block-system, on a radicalement supprimé tout signal et les trains gagnent toujours devant eux, en sorte qu'il arrive parfois que plusieurs trains apparaissent, n'ayant entre eux qu'une dizaine de mètres d'intervalle. Un pareil système diminue forcément un peu la vitesse commerciale, mais, en revanche, il n'y

a plus à compter avec les « ratés » des signaux, ratés qui sont toujours trop nombreux, mais qui se justifient assez par le nombre de fois réellement extraordinaire que doivent fonctionner les signaux sur un réseau un peu étendu (des millions de fois par an).

Nous ne nous risquerions pas, cependant, à éliminer les signaux sur une ligne où la visibilité ne serait pas très étendue. Et cela d'autant plus qu'il y a un intérêt majeur (nous croyons avoir assez insisté sur ce point) à augmenter la vitesse des trains.

Mais il est clair qu'avec des signaux on s'expose parfois à des arrêts simultanés assez prolongés des trains, sans compter que le block-system oblige à réaliser des cantonnements d'une certaine longueur et que, par suite, on se donne forcément, comme limite du resserrement des horaires, celle correspondant au temps que mettront les trains à parcourir deux sections consécutives.

Mais on peut encore réaliser, assez aisément, un service à 2 minutes et même à 1 minute 3/4 ce qui, sauf cas spéciaux, est ordinairement suffisant dans la pratique.

Circulation des trains et terminus. — Le procédé ordinaire de circulation des trains sur les grandes lignes, c'est-à-dire des trains venant d'embranchements pour s'engager sur des artères communes à plusieurs lignes est assurément ce qui convient le mieux pour le public, qui peut ainsi pénétrer de la phériphérie jusqu'au centre même du réseau, sans avoir à changer de train. A Chicago, un système analogue a été appliqué, les trains venant passer sur un quadrilatère commun, desservant la partie la plus centrale de la ville. Mais on conçoit qu'on ne puisse obtenir un tel résultat qu'à la condition de multiplier les embranchements et par suite les aiguillages. Or des aiguillages constituent toujours un point faible dans une exploitation. A la vérité on peut en réduire les inconvénients en faisant passer l'une des voies de la ligne affluente sous les deux voies de la ligne principale, de manière à ce qu'il n'y ait pas de traversée. On peut également combiner

cette dernière disposition avec des aiguillages installés seulement dans des gares et dans des conditions telles qu'il n'y ait plus d'accident à craindre. Néanmoins la circulation de bout en bout ou en *navette*, selon l'expression usuelle, est encore plus simple et c'est celle qui paraît actuellement préférée dans la plupart des métropolitains.

Elle a, comme point de départ, la division du réseau en un certain nombre de lignes distinctes, avec superposition de ces lignes aux points de croisements. Le voyageur qui veut passer d'une ligne à l'autre doit donc changer de train et c'est lui qui doit s'embrancher sur la deuxième ligne, alors qu'avec le premier système, c'est le matériel même qui effectue l'embranchement.

Un tel système, évidemment excessivement simple pour l'exploitant, oblige donc à des changements de trains assez nombreux et doit, forcément, amener des encombrements dans les gares communes. Il faudra, par suite, avoir bien soin de disposer celles-ci en conséquence. Il y a là une difficulté assez sérieuse à résoudre, surtout sur les réseaux où plusieurs lignes très importantes peuvent se croiser en un même point (Paris). Sur les métropolitains s'étendant en longueur (comme à New-York) le service en navette se justifie, au contraire, à tous les points de vue et il ne donne lieu à aucune complication spéciale.

Dans le système en navette le train, une fois arrivé au terminus, doit repartir en sens inverse.

Si l'on suppose que la traction se fait par une locomotive ou par une seule automotrice il faut, si l'on ne veut pas s'astreindre à une manœuvre assez longue, disposer le terminus en *boucle*, de façon qu'après avoir parcouru celle-ci, le train se trouve tout à fait disposé pour le départ.

A défaut de boucle, on pourrait installer au terminus un *triangle américain*. Mais la boucle a ce grand avantage de ne nécessiter aucun aiguillage et de pouvoir être parcourue très rapidement.

Avec le *multiple unit* la boucle n'est plus indispensable, le wattman n'ayant qu'à passer dans la voiture de queue. Mais, même dans ce cas, on ne devra pas encore hésiter à exécuter, si on le peut, un raccordement circulaire.

La question du terminus se trouve singulièrement facilitée, quand on exploite par *circuits*, puisque les trains décrivent, alors, des circuits fermés se recouvrant sur les parties communes et qu'il n'y a plus dans ces conditions, à proprement parler, de terminus. C'est là un avantage intéressant du système à recouvrement, qu'il faut naturellement rapprocher des inconvénients qu'il peut présenter au point de vue des aiguillages.

Dans certaines exploitations on a très intelligemment combiné les terminus des lignes métropolitaines avec plusieurs terminus de tramways qui deviennent, dès lors, des affluents forts précieux pour les lignes métropolitaines. Les avantages d'un tel système sont tellement évidents que l'on peut se demander pourquoi il n'a été appliqué que très exceptionnellement. On en a une facile explication dans ce fait que, bien souvent, les entreprises de transport ne sont pas conçues d'après un plan général, qu'un défaut d'entente existe ordinairement entre les compagnies concessionnaires et, parfois même, entre les administrations chargées de l'octroi des concessions et que, par suite, des intérêt spéciaux prennent trop fréquemment le pas sur l'intérêt général.

On trouve à Boston une combinaison très ingénieuse d'un métropolitain (l'Elevated) avec un réseau de tramways. L'un des terminus (Sullivan Square) est constitué par une boucle en viaduc (fig. 514) dont une des branches pénètre dans un grand hall servant de gare à la fois pour l'Elevated et pour dix lignes de tramways qui ont, en ce point, leur terminus (fig. 515). Toutes les voies, aussi bien celles de l'Elevated que des tramways, sont munies de quais surélevés. Le raccordement des lignes de tramways avec les voies des terminus se fait par des rampes dans l'intérieur et sur les côtés de la boucle.

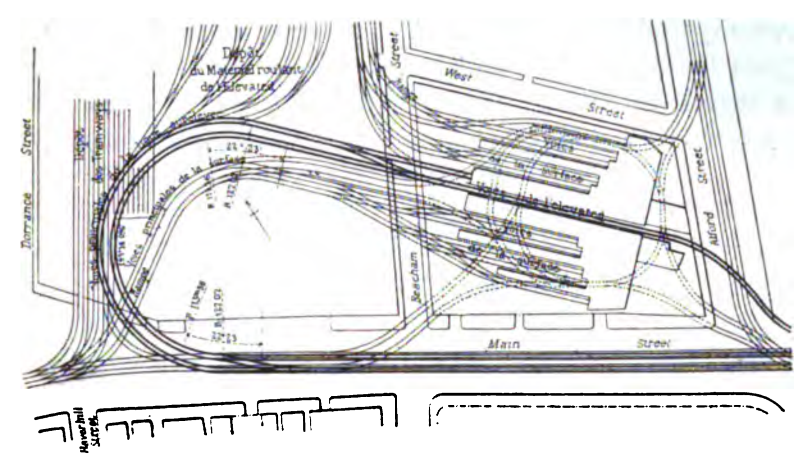


Fig. 514. — Boucle de l'Elevated, de Boston.

Indépendamment de cette gare, qui est sur étage, il en existe

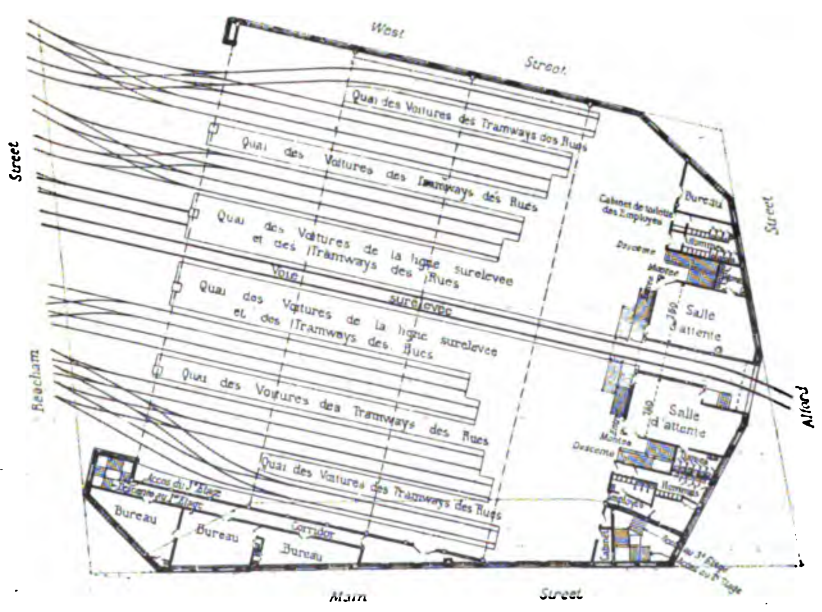


Fig. 515. — Gare commune à l'Elevated et aux tramways.

une autre, au rez-de-chaussée (fig. 516), mais seulement pour les

tramways qui desservent la station, sans y avoir leur terminus. Ces lignes tournent autour de la partie centrale, laissant entre elles un espace dans lequel on a installé une grande salle d'attente[1].

A New-York, l'Elevated donne la correspondance avec un cer-

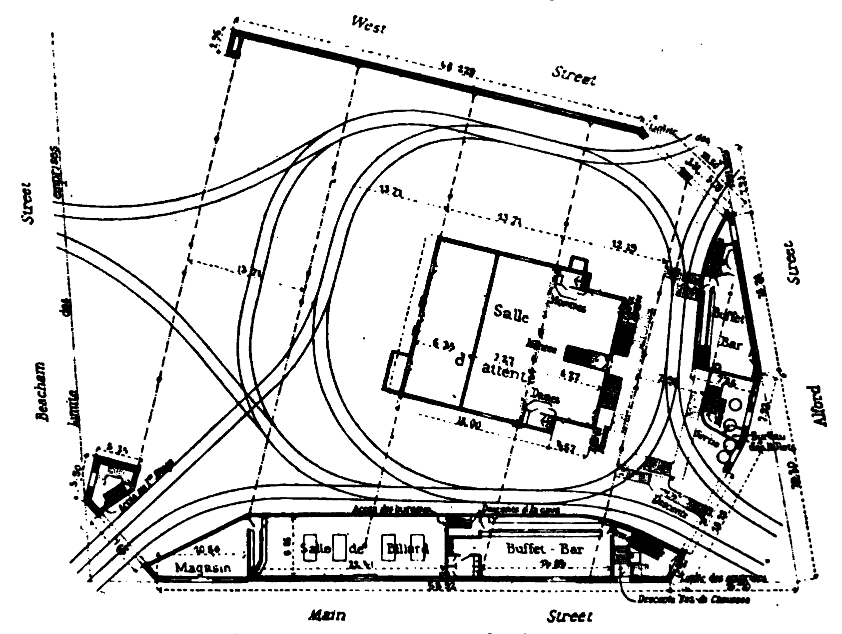


Fig. 516. — Gare du rez-de-chaussée.

tain nombre de lignes de tramways, dépendant de la compagnie exploitante.

C'est là encore un fait à retenir et il est clair que tramways et métropolitains gagneraient à s'entendre, aussi bien pour faciliter les échanges de voyageurs, que pour appliquer des tarifs communs.

Dépôts et ateliers. — Les chemins de fer électriques ne comportent pas, pour ce qui concerne les dépôts et les ateliers, de règles bien particulières.

[1] *Revue Générale des Chemins de fer.*

Évidemment l'entretien des moteurs nécessitera la création d'un outillage spécial; mais l'on pourra, à ce point de vue, se guider très suffisamment d'après les installations faites pour de grands réseaux de tramways.

Par assimilation, également, on devra, dans les dépôts, multiplier les voies sur *fosses générales* et cette disposition s'imposera encore plus, si l'on a recours au *multiple unit*, c'est-à-dire à un système d'exploitation comportant un très grand nombre de voitures automotrices.

Les fosses générales facilitent énormément la visite des moteurs et de l'équipement électrique. Bien entendu elles devront être munies du traditionnel « pit-jack », des lignes américaines. C'est un petit chariot circulant sur rails, dans la fosse même, et qui est muni d'un plateau à vis pouvant venir se fixer sous les moteurs. Quand ceux-ci sont déboulonnés, on fait descendre le plateau et l'on peut alors amener très facilement le moteur jusque dans le rayon de volée d'une grue à main, qui l'enlève et le dépose sur le sol du dépôt.

L'enlèvement d'un moteur ne se fait que de loin en loin, quand il faut, par exemple, procéder au rebobinage des inducteurs et au tournage du collecteur. La visite journalière consiste plus simplement à inspecter et nettoyer le collecteur et à vérifier le calage des balais. Ces opérations se font facilement de la voiture même, en ouvrant des trappes ménagées dans le plancher.

Pour nettoyer le *collecteur*, on fait faire quelques tours à la voiture, afin que toutes les lames de cet organe puissent d'elles-mêmes venir en contact avec un fort chiffon. On enlève ainsi la couche légère de charbon qui tend à se déposer sur les lames, après quelques heures de fonctionnement.

Le *contrôleur* doit, comme le collecteur, être inspecté journellement. Lorsque les arrêts sont fréquents, cet appareil subit un régime particulièrement dur et les centaines de contacts qu'il établit et coupe occasionnent souvent de légères dégradations

qu'il faut réparer, dès le début, si l'on ne veut pas qu'elles s'amplifient rapidement.

Sur les lignes à service intensif et où, par suite d'un horaire prolongé, on ne dispose, chaque nuit, que d'une heure ou deux pour la visite des équipements, on trouvera généralement avantageux de réduire la visite journalière au strict minimum. Mais alors, il faudra s'astreindre à immobiliser le train périodiquement, pendant une journée environ, afin de procéder, à ce moment, à une visite détaillée de toutes les parties électriques et mécaniques des voitures. Ce travail sera fait de jour, c'est-à-dire dans des conditions bien plus avantageuses que le travail de nuit.

On facilite grandement le nettoyage des parties d'accès un peu difficile, en installant le long des fosses une conduite d'air comprimé sur laquelle on ménage, de distance en distance, des ajutages qui permettent, à l'aide d'un tuyau flexible, d'amener un jet d'air énergique en un point quelconque de la voiture.

Nous jugeons inutile de nous étendre davantage sur cette partie spéciale de l'exploitation des chemins de fer électriques, non pas que son intérêt soit minime, mais parce que les compagnies exploitantes ont peu à créer à ce point de vue, possédant généralement des dépôts et des ateliers parfaitement outillés, en même temps qu'elles disposent, pour assurer l'entretien et les réparations du matériel, d'un personnel de premier ordre.

Dépenses de premier établissement. — Dans les dépenses de premier établissement il faut distinguer d'abord toute une partie qui n'est pas spéciale à l'électricité, comme les terrassements, les ouvrages d'art, la voie proprement dite, etc..., sur laquelle il n'y a pas lieu d'insister et des dépenses bien motivées par l'électricité, comme tout ce qui concerne la production et la distribution du courant, ainsi que l'équipement électrique du matériel roulant.

En général on prend, comme appréciation du coût des usines, le *kilowatt installé*.

S'il s'agit d'usines hydrauliques, le prix pourra varier dans de grandes limites, en raison des travaux accessoires : barrages, canal d'amenée, conduites, etc., qui, selon la disposition des lieux, pourront être insignifiants ou représenter des opérations très importantes. Aussi le kilowatt installé qui atteint, par exemple, 4 à 500 francs, dans de bonnes conditions, s'élève-t-il, parfois, à 1000, 1 500 et même 2 000 francs.

L'usine de Servoz, qui alimente le chemin de fer du Fayet à Chamonix et dont nous avons parlé page 68, n'a coûté que 585 francs par kilowatt (dont 175 fr. pour la machinerie), y compris le barrage et la conduite forcée. Au contraire, l'usine des Chavants qui alimente aussi la ligne (voy. p. 69) est revenue à 1 200 francs par kilowatt (dont 170 fr. pour la machinerie), ayant comporté la création d'un canal d'amenée important.

Avec les usines à vapeur la dépense subit des écarts moins considérables, à la condition toutefois qu'on les suppose placées en des points où des dépenses spéciales de fondation et d'amenée d'eau ne seront pas nécessaires. D'autre part, nous éliminerons de notre évaluation la valeur du terrain sur lequel s'élèvera l'usine, donnée bien spéciale à chaque cas. Dans ces conditions, le prix de revient dépendra surtout de l'importance de l'usine et des unités adoptées. Suivant qu'il s'agira d'une usine ordinaire (1000 à 1500 kilowatts), ou d'une très grande installation, avec unités dépassant 7 à 800 kilowatts, on pourra, pour une première estimation, tabler sur les chiffres suivants :

Moteurs et chaudières.	300 à 200 fr.
Matériel électrique	350 à 250 fr.
Maçonnerie et bâtiments	250 à 150 fr.
Total . .	900 à 600 fr.

En Amérique on atteint parfois des dépenses inférieures; mais

la machinerie y coûte moins cher et l'on se contente généralement de bâtiments assez légers. Un prix de 500 francs par kilowatt y est assez normal, pour une grande usine [1].

L'emploi de turbines à vapeur ne modifierait pas, pour le moment, les chiffres ci-dessus, les groupes moteurs et chaudières revenant encore de 2 à 300 francs par kilowatt. Mais, quand les prix se seront tassés, il y aura facilement à gagner une cinquantaine de francs par kilowatt.

Les sous-stations de transformation avec commutatrices ou appareils tournants nécessiteront une dépense d'environ 150 à 200 francs par kilowatt, sans les bâtiments [2].

Quant aux feeders, reliant les usines aux sous-stations et les sous-stations à la ligne, leur évaluation dépend surtout de circonstances locales (distance de l'usine, emplacement des sous-stations par rapport à la ligne, etc...). Souvent il faut compter, pour les feeders, autant que pour les sous-stations.

La distribution de l'électricité le long des voies comporte l'établissement proprement dit de la ligne de distribution et les connexions des rails.

S'il s'agit d'une ligne aérienne, analogue à une ligne de tramway, le prix dépendra surtout de la matière des poteaux (bois ou métal).

Pour un chemin de fer à plate-forme indépendante, le bois est très admissible et la dépense s'établit alors comme il suit :

1° *Voie simple avec conducteurs supportés par des tendeurs reliés à des poteaux placés à droite et à gauche* (par kilomètre) ;

50 poteaux 50 fr.	2 500 fr.
A reporter. . . .	2 500 fr.

[1] A Baltimore le kilowatt installé est revenu à 488 francs.

[2] Quand il s'agit de sous-stations comportant uniquement des transformateurs statiques, la dépense est beaucoup moins élevée (de 30 à 40 fr. par kilowatt).

Report	2 500 fr.
Fils, tendeurs, isolateurs, connexions des rails[1], pose	4 000 fr.
Supplément pour courbes, aiguillages, points spéciaux, parafoudres, etc	1 500 fr.
Total	8 000[2] fr.

2° *Voie simple avec conducteurs supportés par des poteaux à simple console* (par kilomètre);

25 poteaux à 75 fr	1 875 fr.
Fils, tendeurs, isolateurs, connexions des rails. .	4 000 fr.
Supplément pour courbes, aiguillages, points spéciaux, parafoudres, etc	1 125 fr.
Total. . . .	7 000 fr.

3° *Voie double avec conducteurs supportés par des poteaux à double console* (par kilomètre).

25 poteaux à 100 fr	2 500 fr.
Fils, tendeurs, isolateurs, connexions des rails, pose	8 000 fr.
Supplément pour courbes, aiguillages, points spéciaux, parafoudres, etc	1 500 fr.
Total . . .	12 000 fr.

Soit 6000 francs par kilomètre de voie simple.

Avec des poteaux métalliques, la dépense supplémentaire atteindrait facilement de 10 à 12 000 francs pour le premier cas et de 5 à 6000 francs pour les deux derniers.

Avec un 3e rail, la dépense sera d'environ 20 000 francs par kilomètre, suivant détail ci-après :

3e rail proprement dit (de 45 à 50 kg. au mètre courant) avec joints tous les 15 mètres, éclisses mécaniques, pose, supplément pour traverses de support	10 000 fr.

[1] Il s'agit de connexions analogues à des connexions de tramways (6 à 7 fr. par connexion).

[2] Thoune à Burgdorf, 8 250 francs par kilomètre.

Report.	10 000 fr.
Isolation du 3e rail	4 500 fr.
Connexions de la voie et du 3e rail [1]	3 000 fr.
Supplément pour courbes, aiguillages, points spéciaux, pans coupés etc.	2 500 fr.
Total. . . .	20 000 fr.

Pour la voie double, ce prix devrait être doublé. En outre si l'on prévoit la protection du 3e rail, on aura à dépenser, en plus, une somme d'environ 4 000 francs par kilomètre de voie simple[2].

En ce qui concerne le matériel roulant, l'équipement électrique des automotrices donnera lieu à une dépense d'environ 20000 francs pour un équipement à 2 moteurs d'une centaine de chevaux chaque, et d'environ 35 000 francs pour un équipement à 4 moteurs de même puissance.

Il faudra, bien entendu, pour avoir la dépense complète, par voiture, ajouter aux prix ci-dessus la dépense relative aux caisses et trucks, soit environ 15 000 francs pour une voiture à 2 essieux et de 20 000 à 25 000 francs pour une voiture à bogies.

Enfin si l'on considère une locomotive, le prix sera d'environ 80 à 100 francs par cheval pour la partie électrique. Il faudra compter à peu près autant pour la locomotive elle-même[3].

Avec les prix ci-dessus on pourra se rendre compte rapidement des dépenses qu'entraînerait la transformation d'une ligne existante.

S'il s'agit d'une ligne nouvelle, l'évaluation des dépenses autres que celles concernant la partie électrique, pourra être faite

[1] Ces connexions sont évaluées à 15 francs l'une (connexions doubles). La dépense sera plus considérable si, en raison du courant à écouler, il faudra ajouter une ou deux connexions supplémentaires.

[2] Nous avons dit (p. 203) que lorsque le 3e rail, ou des conducteurs analogues, en acier, doivent être montés aériennement, la dépense est extrêmement élevée. A Baltimore, les conducteurs aériens, avec la charpente métallique qui les soutient, sont revenus à 132 000 francs par kilomètre.

[3] Les locomoteurs de 600 chevaux de la Compagnie de l'Ouest (voy. p. 466) ont coûté 120 000 francs.

facilement d'après les statistiques si nombreuses des Compagnies et, pour cette raison, nous ne nous y attarderons pas.

Il ne semble pas inutile, toutefois, de compléter les chiffres ci-dessus par des données d'ensemble concernant la nouvelle classe des chemins de fer métropolitains, dont le développement a été si rapide pendant ces dernières années.

A Paris, le Métropolitain coûte de 3 000 000 à 3 500 000 francs par kilomètre (voie double) pour l'infrastructure et environ 1 500 000 francs pour la superstructure (y compris usine et sous-stations). A Berlin le Métropolitain est revenu[1] à 3 750 000 francs par kilomètre, pour l'ensemble de la superstructure et de l'infrastructure.

Les métropolitains de Londres ont coûté sensiblement plus, conséquence du système tubulaire, de la grande profondeur des lignes et de l'installation des ascenseurs. D'après les derniers rapports des conseils d'administration, le Central London reviendrait (infrastructure et superstructure) à 9 500 000 francs par kilomètre. Le City and South London n'aurait coûté que 6 400 000 francs.

Tous ces chiffres sont extrêmement élevés. Heureusement que l'on peut, en regard, placer des chiffres de recettes autrement considérables que ceux que peuvent donner les meilleurs chemins de fer. Les recettes brutes atteignent en effet 900 000 francs par kilomètre et par an sur le Central London et 750 000 francs sur le métropolitain de Paris.

Dépenses d'exploitation. — Les dépenses d'exploitation des chemins de fer électriques comprennent une partie spéciale à la traction électrique, comme celles concernant le courant, l'entretien des équipements électriques et des lignes de distribution et une partie que l'on retrouve dans toutes les entreprises de chemin de fer comme les frais généraux, l'entretien des voies, celui des voitures remorquées, etc...

[1] *Revue générale des chemins de fer*. 24 août 1902. Le prix indiqué ne comprend pas les acquisitions de terrains qui ont atteint environ 800 000 fr. par kilomètre.

Nous nous attacherons surtout aux dépenses de la première catégorie et parmi celles-ci nous distinguerons, tout d'abord, les dépenses concernant l'énergie électrique, dépenses dont l'importance est prépondérante, parmi les frais proprement dits de traction.

Les usines hydro-électriques permettent naturellement d'obtenir l'énergie électrique à un prix beaucoup plus bas que les usines à vapeur, puisqu'elles ne consomment pas de charbon. Quelques grandes usines, comme celles du Niagara, peuvent produire le kilowatt-heure à 0,005 fr. Mais il s'agit là d'un prix tout à fait exceptionnel. Il faut compter qu'une usine hydro-électrique, de dimensions moins colossales, donnera le kilowatt-an à un prix variant de 100 à 150 francs, soit 0,013 fr. à 0,021 fr. par kilowatt-heure, en supposant une durée d'utilisation de 7000 heures par an.

Avec la vapeur, des éléments capitaux interviennent pour faire varier, dans des limites assez étendues, le prix de revient du kilowatt-heure, à l'usine. Ce sont le prix du charbon, le nombre et la puissance des unités, la consommation spécifique des chaudières et des machines, un outillage plus ou moins perfectionné, l'abondance de l'eau d'alimentation et de condensation etc...

Si l'on considère une usine de plusieurs milliers de kilowatts, *placée dans les meilleures conditions*, avec des unités de 7 à 800 kilowatts au minimum, brûlant du charbon de prix moyen (15 à 20 francs la tonne), le prix du kilowatt-heure, à la sortie de l'usine, pourra s'abaisser à 5 ou 6 centimes. Sur ce prix 45 à 50 p. 100 se rapportent à la dépense en charbon, la consommation de ce combustible, par kilowatt-heure, étant de 1,4 kg. à 1,6 kg. [1].

[1] Avec la vapeur surchauffée, on pourrait obtenir des consommations de 1 kilogramme à 1,2 kg.

Il faut bien remarquer que les chiffres indiqués se rapportent à des consommations courantes et non à des *consommations d'essai*. On obtiendra facilement, pour une machine Compound de 700 à 800 kilowatts sans surchauffe, une garantie de

En Amérique, le bas prix du charbon permet souvent d'obtenir le kilowatt-heure à un prix inférieur à 0,05 fr. C'est ainsi que le kilowatt-heure revient à :

0,0404 fr. à Baltimore avec du charbon à		6,77 fr.
0,0328 fr. au West-Side de Chicago	—	10 fr.
0,0350 fr. au Boston Elevated	—	10 fr.
0,0350 fr. à Aurora Elgin	—	7 fr.
0,0218 fr. à Indianapolis	—	7,50 fr.

A l'usine du Métropolitain de Paris, avec du charbon coûtant environ 28 francs, le prix du kilowatt-heure est de 0,07 fr. L'élévation de ce prix est dû spécialement aux droits d'octroi qui frappent le charbon. Hors Paris, des usines de traction, comparables par leur puissance à celle du Métropolitain, obtiennent le kilowatt-heure à environ 0,055 fr.

Après le charbon ce sont les dépenses de personnel qui ont le plus d'influence sur le prix de revient du kilowatt-heure. On les diminuera par l'emploi de puissantes unités, l'adoption de systèmes mécaniques pour l'apport du charbon, l'enlèvement des cendres et escarbilles, la distribution de l'huile et, surtout, *par la substitution du chargement automatique des chaudières au chargement à la pelle*[1]. Avec de telles installations le prix de la main-

1,2 kg. ; mais, par suite des variations de la charge ou autres particularités du régime de marche de l'usine, on atteindra pratiquement de 1,5 kg. à 1,6 kg.

Avec du charbon de qualité inférieure la consommation spécifique par kilowatt-heure augmente, naturellement, dans d'assez grandes limites. Voici, à titre d'indication, quelques chiffres de consommation relevés dans un certain nombre de grandes usines :

Usines.	Prix de la tonne de charbon.	Kilogrammes de charbon consommés par kilowatt-heure.
—	—	—
Baltimore	7,50 fr.	1,720 kg.
West Side, Chicago	7,50 fr.	2,000 kg.
Boston Elevated	10,00 fr.	1,400 kg.
Indianapolis	7,50 fr.	1,720 kg.
Manhattan New-York	10,00 fr.	1,400 kg.
Métropolitain de Paris	28,00 fr.	1,400 kg.

[1] C'est ainsi qu'en Amérique, dans les nombreuses usines où le chargement automatique des chaudières est appliqué, on brûle de 6 à 700 kilogrammes de char-

d'œuvre pourra s'abaisser à environ 20 p. 100 du prix total du kilowatt-heure. Dans des usines bien moins outillées on atteindrait facilement 25 p. 100.

Quant au reste de la dépense, elle sera d'environ 5 p. 100 pour l'huile, la graisse, les chiffons et de 20 p. 100 pour les réparations et l'entretien [1].

Il faut bien noter que les prix donnés ci-dessus se rapportent à de *très grandes usines pour traction, marchant presque sans interruption pendant vingt-quatre heures* et qui, de ce fait, se trouvent, au point de vue du prix de revient, dans des conditions bien plus avantageuses que des usines d'éclairage [2].

Pour des usines de puissance modeste, on atteindrait facilement de 8 à 9 centimes. Mais, en matière de traction de chemin de fer, il est clair que ce sont surtout des usines de grande puissance que l'on a à considérer.

En dehors des usines hydro-électriques et des usines à vapeur on peut envisager la production de l'électricité dans des usines avec moteurs à gaz, soit que le gaz provienne de gazogènes spé-

bon par jour et par chauffeur, alors qu'en France, où nous paraissons ignorer ce perfectionnement, il faut environ un chauffeur pour 1 800 kilogrammes.

[1] On pourra à ce sujet consulter, avec intérêt, le prix de revient ci-après :

Prix de revient du kilowatt-heure à la sortie des usines.

Usines.	Charbon.	Main-d'œuvre.	Huile, graissage, réparations, entretien, etc.	Total.
—	—	—	—	—
	fr.	fr.	fr.	fr.
Baltimore	0,0188	0,0176	0,0040	0,0394
West Side Chicago . .	0,0150	0,0060	0,0090	0,0300
Boston Elevated . . .	0,0140	0,0070	0,0140	0,0350
Aurora Elgin.	0,0217	0,0100	0,0030	0,0347
Indianapolis	0,0127	0,0056	0,0035	0,0218
Métropolitain de Paris.	0,0420	0,0140	0,0140	0,0700

[2] Les usines pour éclairage ont non seulement une utilisation journalière très faible, mais elles sont extrêmement malutilisées pendant la belle saison. Aussi les exploitants cherchent-ils à vendre, concurremment, le plus possible de courant pour force motrice. Telle usine pour éclairage, qui fabriquera le courant à 0,20 fr. et souvent même 0,25 fr. le kilowatt-heure, sans force motrice, verra son prix de revient s'abaisser facilement à 0,10 fr., avec une vente de force motrice égale à seulement 30 ou 40 p. 100 de la production totale.

ciaux, soit qu'il constitue un des sous-produits d'une autre industrie (fours à coke, hauts fourneaux). Les statistiques font actuellement défaut pour indiquer quel est le prix du kilowatt-heure dans ces conditions. Cependant quelques installations de tramways d'importance secondaire, fonctionnent avec des moteurs à gaz pauvre. On y produit le kilowatt-heure pour une consommation d'environ 900 grammes d'anthracite et l'on peut, quand l'anthracite ne dépasse pas 30 à 35 francs la tonne, obtenir le kilowatt-heure, tout compris, aux environs de 8 à 9 centimes. Il n'est pas douteux que, dans une installation très importante, on atteindrait un chiffre sensiblement plus bas.

Il en serait de même dans le cas où l'on pourrait utiliser le gaz des fours à coke ou des hauts fourneaux. Si l'on considère, par exemple, un haut fourneau produisant 100 tonnes de fonte par vingt-quatre heures, le gaz combustible recueilli, à titre de sous-produit, sera susceptible d'alimenter, pendant la même durée, un moteur de 2000 chevaux. Le kilowatt-an reviendrait, dans ces conditions, à une centaine de francs, ce qui placerait la production dans une situation aussi favorable que si elle était assurée par une bonne usine hydro-électrique.

Nous avons vu que, dans le cas le plus général, le courant était produit à l'usine à haute tension et qu'il devait être transformé dans des sous-stations reliées directement aux lignes de distribution. Si l'on veut avoir le prix de revient du courant au tableau des sous-stations, on devra ajouter aux prix fixés plus haut :

1° Les dépenses occasionnées par la perte de charge dans la ligne primaire (rendement 95 à 90 p. 100) ;

2° Les pertes d'énergie de la transformation (transformateurs statiques, rendement 95 p. 100 ; commutatrices, rendement 85 p. 100) ;

3° Les frais de main-d'œuvre et d'entretien des sous-stations (environ 0,005 fr. par kilowatt-heure distribué).

Les rendements partiels ci-dessus indiqués, correspondant (dans le cas le plus défavorable des commutatrices) à un rendement total de 75 p. 100, il faudra, pour distribuer 1 kilowatt-heure, produire à l'usine 1,33 kilowatt-heure, ce qui revient à augmenter d'un tiers le prix de revient à l'usine. Par conséquent avec du courant à 5 ou 6 centimes, le prix à la sortie des sous-stations sera (toujours dans le cas de très grandes installations) de 0,066 fr., ou de 8 centimes soit 0,071 fr. et 0,085 fr., avec les frais de main-d'œuvre et d'entretien de la sous-station.

Pour passer du prix du courant au prix de la consommation d'énergie par tonne-kilomètre on devra se rappeler les coefficients établis précédemment pour la consommation en watts-heure par tonne-kilomètre. Ces coefficients sont essentiellement variables, selon le service que les trains ont à effectuer et selon l'allure générale du profil en long de la ligne.

Si l'on considère une ligne à *trafic intensif* et à démarrages fréquents, on consommera facilement 45 watts-heure par tonne-kilomètre. On arriverait ainsi, pour une voiture de 20 tonnes, à une consommation de 900 watts-heure par voiture-kilomètre, soit 1 kilowatt-heure, pour tenir compte de la perte de charge en ligne. A raison de 8 centimes le kilowatt-heure, la dépense atteindrait 8 centimes, soit 9 centimes pour tenir compte des services accessoires (éclairage, chauffage, ventilation, ascenseurs, etc.).

Quant aux autres dépenses on peut, mais seulement d'une façon très approximative, attendu que les espèces sont essentiellement variables, les évaluer comme il suit :

Entretien de la voie	0,002 fr.
Entretien des voitures et équipements	0,060 fr.
Personnel de la traction et de l'exploitation . . .	0,10 fr.
Frais généraux	0,10 fr.
Divers	0,05 fr.

Ce qui mettrait le kilomètre-voiture, courant compris, à 0,402 fr. soit 0,40 fr.

Ce chiffre se rapproche assez bien de ceux que l'on obtient sur le Central London et sur le City and South London.

Sur le métropolitain de Paris le prix est un peu plus faible (0,31 fr.), mais les voitures, qui ne sont qu'à deux essieux, ne pèsent, en moyenne (automotrices et remorques) que 12 à 13 tonnes[2].

Il y a lieu de remarquer que les chiffres qui viennent d'être indiqués sont des chiffres moyens s'appliquant à la fois, aux automotrices et aux remorques et pour des trains de faible importance (de 4 à 8 voitures, par exemple). Dans le cas où il est fait usage de locomotives les dépenses concernant ces dernières ont été supposées réparties sur les voitures. Enfin les frais ne comprennent pas le renouvellement des voies, renouvellement qui peut, cependant, sur des lignes à trafic aussi intense que celles considérées, représenter annuellement une dépense très importante.

Si l'on envisage maintenant une *ligne suburbaine*, le moins grand nombre de démarrages abaissera la consommation à 25 ou 30 watts-heure par tonne-kilomètre. Mais, comme en raison de l'intensité moins grande du trafic on parcourra moins de kilomètres, par kilomètre de ligne, les frais généraux et ceux d'entretien du matériel et de la voie seront, proportionnellement, plus élevés. Aussi viendront-ils compenser l'économie que procurera une consommation moins grande d'électricité, en sorte que le prix de revient de la voiture-kilomètre se fixera probablement aux environs de ceux qui viennent d'être calculés.

Les statistiques font défaut pour évaluer le prix de revient de

[1] *Central London*, 1er semestre 1903, 0,39 fr. par voiture-kilomètre.

[2] Pour 1902, le prix de revient de la voiture-kilomètre s'établit comme il suit :

Énergie électrique	0,08 fr.
Entretien de la voie, des stations, signaux, téléphones	0,03 fr.
Personnel de la traction et de l'exploitation	0,09 fr.
Entretien du matériel	0,04 fr.
Frais généraux	0,07 fr.
Total	0,31 fr.

la voiture-kilomètre, pour un service analogue à celui d'une grande ligne, c'est-à-dire avec des trains comportant un très grand nombre de voitures. Nous avons toutefois indiqué quelles étaient les bases de la consommation (25 à 30 watts-heure par tonne-kilomètre pour des petites vitesses et 50 à 55 watts-heure, pour des vitesses d'express). Si l'on considère les statistiques des six grandes Compagnies françaises, on trouve que la voiture-kilomètre revient à 0,123 fr., dépense dans laquelle le charbon figure seulement pour 0,015 fr.[1] En admettant que l'emploi de l'électricité procure une économie de charbon de 20 p. 100, le prix de revient de la voiture-kilomètre ne s'abaisserait que de 0,003 fr. Il est vrai que les frais d'entretien du matériel seraient également un peu diminués; mais ces deux économies réunies n'auraient, en fait, que peu d'influence sur le prix de revient. Ce qui montre que (du moins avec notre organisation actuelle) la traction électrique ne peut avoir la prétention de se substituer d'une façon radicale à la traction à vapeur. Mais le prix de 0,123 fr., indiqué plus haut, est un prix moyen, qui s'applique aussi bien aux wagons à marchandises qu'aux voitures à voyageurs. Pour certaines lignes et surtout pour les trains express il est sensiblement plus élevé et, dans ce cas, l'électricité retrouvera toute sa supériorité.

Coefficient d'exploitation. — Dans l'industrie des transports, on considère souvent, pour traduire par un chiffre facile à retenir les résultats économiques de l'entreprise, un coefficient dit *coeffi-*

1. Le prix de revient de 0,123 fr. se décompose comme il suit :

Administration centrale et frais généraux (10 0/0) . . .	0,0123 francs
Exploitation (33,5 0/0)	0,0412 —
Matériel et traction (36,8 0/8)	0,0453 —
Voie et bâtiment (18,7 0/0)	0,0230 —
Exercices clos et divers (1 0/0)	0,0012 —
Total. . . .	0,1230 francs.

D'autre part, dans les dépenses de matériel et traction, le charbon figure pour 34 0/0, soit 0,0154 francs.

cient d'exploitation. C'est le rapport des dépenses aux recettes brutes. Par exemple si, pour une ligne, le coefficient d'exploitation est de 55 p. 100, cela implique que les dépenses sont égales à 55 p. 100 des recettes brutes. Comme conséquence, les recettes nettes s'élèvent à 45 p. 100.

Si la notion du coefficient d'exploitation est parfois très utile, il faut, en revanche, se garder de lui attacher une trop grande importance, car elle ne suffit pas, à elle seule, pour caractériser, d'une façon suffisamment précise, la situation industrielle d'une Compagnie. Ce coefficient n'est, en effet, qu'un rapport.

Mais quand il s'agit d'entreprises comparables, ou encore d'une même entreprise dont on veut étudier les variations, la donnée devient moins vague et présente alors un réel intérêt.

On sait que le coefficient d'exploitation des chemins de fer est de 50 à 55 p. 100, avec une certaine tendance à l'augmentation en raison de l'accroissement des salaires. Il est probable que la traction électrique, si elle était généralisée, ne diminuerait pas sensiblement ce coefficient. Mais elle augmenterait certainement le coefficient de fréquentation des lignes et conduirait, en somme, à une augmentation des recettes nettes, puisque les recettes brutes totales augmenteraient.

Si, à ce point de vue, les avantages de la traction électrique, quoique très appréciables quant au résultat final, n'apparaissent pas d'une façon très saisissante, en revanche dès qu'il ne s'agit plus de chemins de fer, en général, mais de chemins de fer à trafic intense, comme les métropolitains et les suburbains, la supériorité de l'électricité sur la vapeur est telle qu'elle doit se traduire par une amélioration du coefficient d'exploitation.

C'est ce que l'on a constaté dans maintes entreprises et ce qui, par suite, en a incité d'autres à remplacer la traction à vapeur par la traction électrique (Chemin de fer élevé de New-York, Métropolitain de Londres, etc.).

Selon les tarifs, on peut atteindre, alors, des chiffres particulièrement bas.

C'est ainsi que, sur le Métropolitain de Paris, le coefficient d'exploitation (1902) s'établit à 41 p. 100, avec une certaine tendance à la diminution, au fur et à mesure que le réseau se développe. Au City and South London il est de 46 p. 100. Sur le Central London il atteint, il est vrai, 50 p. 100 ; mais, sans les ascenseurs, il s'abaisserait à 45 p. 100

Lorsque les recettes brutes d'une entreprise sont connues, le coefficient d'exploitation devient par là même une notion tout à fait précise. Mais alors que nous avons pu, précédemment, chiffrer, d'une façon assez exacte les limites des dépenses d'exploitation nous ne pourrions raisonner, en ce qui concerne les recettes, que sur des hypothèses, et par suite sans grande utilité, puisque toute ligne a une valeur donnée, qui la caractérise.

Ce qu'il est intéressant de noter, c'est que la traction électrique sera susceptible, s'il s'agit d'une ligne préexistante, d'augmenter les recettes brutes dans une très large mesure. L'exemple de certains chemins de fer transformés, comme celui de Milan à Varèse, est, à ce sujet, tout à fait typique. En sorte que si des erreurs d'appréciation sont assez faciles à commettre, quand il s'agit d'une ligne nouvelle, on disposera, en revanche, de données tout à fait certaines, quand le problème, et c'est de beaucoup le plus usuel, se réduira à l'appréciation financière et économique d'une transformation.

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE V

ALIMENTATION DES LIGNES DE DISTRIBUTION

CHAPITRE VI

MOTEURS ÉLECTRIQUES POUR CHEMINS DE FER

CHAPITRE VII

TRACTION

CHAPITRE VIII

AUTOMOTRICES ÉLECTRIQUES

CHAPITRE IX

LOCOMOTIVES ÉLECTRIQUES

CHAPITRE X

CHEMINS DE FER DIVERS A TRACTION ÉLECTRIQUE

CHAPITRE XI

EXPLOITATION ET DÉPENSES

ÉVREUX, IMPRIMERIE DE CHARLES HÉRISSEY

CATALOGUE DE LIVRES

SUR

L'ÉLECTRICITÉ, LA MÉCANIQUE
ET LES MACHINES

PUBLIÉS PAR

La Librairie Polytechnique CH. BÉRANGER

Successeur de BAUDRY et Cie

15, RUE DES SAINTS-PÈRES, A PARIS

21, RUE DE LA RÉGENCE, A LIÈGE

Le catalogue complet est envoyé franco sur demande.

Traité d'électricité et de magnétisme.

Traité d'électricité et de magnétisme. Système d'unités absolues. Electrostatique. Electrocinétique. Magnétisme. Electromagnétisme. Application de l'Electromagnétisme. Instruments de mesure électrique. Méthodes générales de mesure électrique. Méthodes de mesures spéciales aux lignes électriques. Détermination des unités électriques. Détermination de l'ohm. Cours professé à l'Ecole supérieure de télégraphie, par A. Vaschy, ingénieur des télégraphes. 2 volumes grand in-8° avec figures dans le texte . . . . 25 fr.

Théorie de l'électricité.

Théorie de l'électricité. Exposé des phénomènes électriques et magnétiques fondé uniquement sur l'expérience et le raisonnement, par A. Vaschy, ingénieur des télégraphes. 1 volume grand in-8° avec 74 figures dans le texte, relié. . . . 20 fr.

Traité pratique d'électricité.

Traité pratique d'électricité à l'usage des ingénieurs et constructeurs. Théorie mécanique du magnétisme et de l'électricité, mesures électriques, piles, accumulateurs et machines électrostatiques, machines dynamo-électriques génératrices, transport, distribution et transformation de l'énergie électrique, utilisation de l'énergie électrique, par Félix Lucas, ingénieur en chef des ponts et chaussées. 1 volume grand in-8° avec 278 figures dans le texte. . . . . 15 fr.

Électricité industrielle.

Traité d'électricité industrielle, théorique et pratique, par Marcel Deprez, membre de l'Institut. 2 volumes grand in-8° avec de nombreuses figures dans le texte, paraissant en 4 fascicules. Prix de l'ouvrage complet. . . . . 48 fr.

Chaque fascicule se vend séparément. . . . . 12 fr.

Électricité industrielle.

Traité pratique d'électricité industrielle. Unités et mesures ; piles et machines électriques ; éclairage électrique ; transmission électrique de l'énergie ; galvanoplastie et électro-métallurgie ; téléphonie, par E. Cadiat et L. Dubost. 6e édition, 1 volume grand in-8° avec 291 gravures dans le texte, relié. . . . . . 16 fr. 50

Manuel pratique de l'électricien.

Manuel pratique de l'électricien. Guide pour le montage et l'entretien des installations électriques. Production de l'électricité. Transformation des courants élec-

triques. Eclairage électrique. Transmission électrique de l'énergie. Sonneries électriques. Signaux. Téléphones. Inflammation des torpilles et des mines. Galvanoplastie, par E. Cadiat. 4e édition, 1 volume in-12 avec 243 figures dans le texte, relié 7 fr. 50

Manuel pratique d'électricité industrielle.

Manuel pratique d'électricité industrielle. Théorie et applications à l'usage des contre-maîtres, monteurs, ouvriers electriciens et mécaniciens s'occupant d'électricité, par Ch. Girvet, ingénieur électricien. 1 volume in-18 jesus contenant 259 figures dessinées par l'auteur. Relié. . . . . 5 fr.

Aide-mémoire de poche de l'électricien.

Aide-mémoire de poche de l'électricien. Unités. Machines électriques. Machines à courants continus et à courants alternatifs. Self-induction. Capacités. Transformateurs. Conducteurs d'énergie. Canalisations électriques. Moteurs électriques. Eclairage électrique. Distribution de l'énergie. Traction électrique. Electro-métallurgie. Sonneries. Téléphones. Prescriptions administratives; guide pratique à l'usage des ingénieurs, monteurs, amateurs électriciens, etc., par Ph. Picard et A. David, ingénieurs des arts et manufactures. 2e édition par A. David. 1 volume, format oblong de 0 m. 1:5 × 0 m. 08, relié en maroquin, tranches dorées 6 fr. 50

Contrôle des installations électriques.

Contrôle des installations électriques au point de vue de la sécurité. Le courant électrique, production et distribution de l'énergie, mesures, effets dangereux des courants, contrôle à l'usine, contrôle du réseau, des installations intérieures et des installations spéciales, résultats d'exploitation, règlements français et étrangers, par A. Monmerqué, ingénieur en chef des ponts et chaussées, précédé d'une préface de M. Hippolyte Fontaine, président honoraire de la chambre syndicale des électriciens. 1 volume in 8e avec de nombreuses figures dans le texte, relié.
Epuisé. Une nouvelle édition paraîtra en juillet 1903.

Canalisations électriques.

Les canalisations électriques, 1re partie. Fonctionnement et calcul des canalisations à courant continu, par Teichmüller, directeur de l'Institut Electrotechnique de Karlsruhe, traduit de l'allemand avec autorisation de l'auteur, par P. Breuil, ingénieur électricien. 1 vol. grand in-8e avec 155 figures dans le texte, relié. 15 fr.

Canalisations électriques.

Essais et vérifications des canalisations électriques en fabrication à la pose et en exploitation, par G. Charpentier, ingénieur-électricien. 1 volume grand in-8e avec 250 figures dans le texte, relié. . . . . 15 fr.

Contrôle des réseaux électriques.

Nouvelle méthode générale de contrôle de l'isolement et de recherche des défauts sur les réseaux électriques pendant le service, par P. Charpentier, ingénieur-électricien. 1 brochure in-8e avec figures dans le texte . . . . 2 fr. 50

L'Électricité et ses applications. — Piles électriques.

L'électricité et ses applications, 1re partie. Les piles électriques. Principes généraux d'électricité et de magnétisme. Applications domestiques, industrielles et médicales. Notions de mécanique et de physique, par A. Reboud, professeur de physique et de chimie. 1 volume in-8e contenant 225 figures dans le texte, relié 7 fr. 50

L'Électricité dans l'industrie.

L'électricité dans l'industrie. Rapport présenté à l'Association des anciens élèves des Ecoles supérieures de commerce et d'industrie de Rouen, par Raoul Lemoine, ingénieur. 1 volume in-8e avec gravures dans le texte. . . . . 6 fr.

L'Année électrique.

L'année électrique, électrothérapique et radiographique. Revue annuelle des progrès électriques. Electro-chimie, éclairage, chauffage électrique, télégraphie, téléphonie, télégraphie et téléphonie sans fil, traction électrique. L'électricité à la guerre, etc., électrothérapie, radiographie, par Foveau de Courmelles, médecin-électricien. 1 volume in-18. Chaque année. . . . . 3 fr. 50
Cette publication a commencé à paraître en 1900.

L'Année électrique.

L'année électrique, ou exposé annuel des travaux scientifiques, des inventions et

des principales applications de l'électricité à l'industrie et aux arts, par Ph. Delahaye. 8 volumes in-12 (1885 à 1892). Prix de chaque volume. . . . . . 3 fr. 50

Électrolyse.

Electrolyse ; renseignements pratiques sur le nickelage, le cuivrage, la dorure, l'argenture, l'affinage des métaux et le traitement des minerais au moyen de l'électricité, par Hippolyte Fontaine. 2e édition, 1 volume grand in-8° avec gravures dans le texte, relié . . . . 15 fr.

Électrolyse.

Etude sur le raffinage électrolytique du cuivre noir, par Hugon. 1 brochure grand in-8° . . . . 1 fr. 50

Électro-chimie.

Traité théorique et pratique d'électro-chimie. Constantes chimiques, mécaniques et électriques. Systèmes électrolytiques. Lois générales de l'électrolyse. Théorie de l'électrolyse. Traitement électrolytique des composés chimiques. Electrolyse appliquée à la chimie organique. Réaction chimique de l'étincelle et de l'effluve électriques, par Adolphe Minet, directeur du journal *l'Electro-Chimie*. 1 volume grand in-8° contenant 206 figures dans le texte, relié. . . . . 18 fr.

Électro-Métallurgie.

Traité théorique et pratique d'électro-métallurgie. Galvanoplastie, analyses électrolytiques, électro-métallurgie par voie humide, méthodes électrolytiques, calcul des conducteurs, chauffage électrique, l'arc voltaïque et charbons électriques, travail électrique des métaux, les fours électriques, électro-métallurgie par voie sèche, méthodes électrolytiques et électro-thermiques, électro-thermie, par Adolphe Minet, directeur du journal *l'Electro-chimie*. 1 volume grand in-8° contenant 205 figures dans le texte, relié . . . . 20 fr.

Dictionnaire électrotechnique.

Dictionnaire électrotechnique Français-Allemand-Anglais, par Paul Blaschke. 3 volumes in-8° . . . . 22 fr. 50

On vend séparément :

Français-Allemand-Anglais, 1 volume. . . . . 7 fr. 50
Allemand-Anglais-Français, 1 volume. . . . . 7 fr. 50
Anglais-Allemand-Français, 1 volume . . . . 7 fr. 50

Essai des machines électriques.

Pratique des essais des machines électriques à courant continu et alternatif. Plancher d'essais. Essais de laboratoire. Essais des machines dynamo à courant continu. Moteurs à courant continu. Essais des moteurs de tramways. Mesure et transformation de la puissance. Alternateurs. Moteurs synchrones. Commutatrices. Moteurs d'induction. Transformateurs, par E. Duquesne, ingénieur à la Société *Maison Beer*, Jemmeppe-sur-Meuse, et U. Rouvière, ingénieur à la Société Electricité-Hydraulique, Jeumont (Nord). 1 volume in-8° contenant 233 figures dans le texte, relié . . . . 15 fr.

Moteurs pour dynamo.

Moteurs pour dynamo. Moteurs à vapeur. Moteurs hydrauliques. Moteurs à gaz et à pétrole par Ch. Gruet, ingénieur électricien. 1 volume in-12 avec 167 figures dans le texte, relié. . . . . 7 fr. 50

Machines dynamo.

Les machines dynamo-électriques à courant continu et à courants alternatifs, par Gisbert Kapp, traduit de l'allemand par P. Lecler, ingénieur des arts et manufactures. 1 volume in-8° avec 200 figures dans le texte, relié. . . . . . . 16 fr.

Machines dynamo-électriques.— Enroulements.

Des enroulements et de la construction des induits des machines dynamo-électriques à courants continus. Enroulements fermés, en anneau, en tambour, ouverts. Exécution des enroulements, construction des enduits, par E. Arnold, professeur et directeur de l'Institut électro-technique de Carlsruhe. Traduit de l'allemand par Boy de la Tour, ingénieur. 1 volume in-8° avec 418 figures dans le texte et 12 planches, relié. . . . . 20 fr.

Machines dynamo-électriques.

Traité théorique et pratique des machines dynamo-électriques, par R.-V. Picou, ingénieur des arts et manufactures. 1 volume grand in-8° avec 198 figures dans le texte. . . . . 12 fr. 50

Machines dynamo-électriques.

Traité théorique et pratique des machines dynamo-électriques. Eléments. Principes. Théorie. Induits. Enroulement des induits. Dynamo à courant continu Dynamos diverses. Alternateurs. Moteurs asynchrones. Transformateurs. Moteurs dynamo. Transmission de l'énergie. Régulateurs. Epreuves de machines. Conduite des dynamos, par Silvanus P. Thompson, traduit par E. Boistel. 3e édition, 1 volume grand in-8° avec figures dans le texte, relié. . . . . 30 fr.

Machines dynamo-électriques.

La machine dynamo-électrique, exposé théorique, calculs, applications pratiques, par Frœlich, traduit de l'allemand par E. Boistel. 1 volume grand in-8° avec 62 figures dans le texte . . . . 10 fr.

Moteurs asynchrones polyphasés.

Méthode pratique pour calculer les moteurs asynchrones polyphasés. Champ tournant, forces électromotrices induites par le champ tournant, couple électromagnétique, actions magnétisantes des enroulements, résistance des bagues du court-circuit, des enduits en cage d'écureuil, diagramme de fonctionnement des moteurs polyphasés. Applications pratiques, par Boy de la Tour, ingénieur. 1 volume in-8° contenant 70 figures dans le texte. . . . . 12 fr. 50

Constructions électro-mécaniques.

Constructions électro-mécaniques ; recueil d'exemples de construction et de calculs de machines dynamos et appareils électriques industriels, par Gisbert Kapp, traduit de l'allemand par A.-O. Dubsky et P. Girault, ingénieurs-électriciens. 1 volume in-4° avec 54 figures dans le texte et 25 planches, relié. . . . . . . 30 fr.

Éclairage électrique.

Installations d'éclairage électrique. Manuel pratique. Unités, mesures, compteurs industriels, machines dynamos, accumulateurs, transformateurs, lampes électriques, canalisation, conducteurs aériens, conducteurs souterrains. Appareils auxiliaires, systèmes de distribution, coût des installations. Lois et règlements, par E. Piazzoli, ingénieur civil. Traduit de l'italien par G. Cuccrullo et E. A. della Santa, ingénieurs. 1 volume in-8° contenant 264 figures dans le texte et 90 tableaux, relié. . . . . 16 fr.

Éclairage électrique.

Eclairage à l'électricité. Renseignements pratiques, par Hippolyte Fontaine. — *Epuisé. Une nouvelle édition est en préparation.*

Éclairage électrique.

Eclairage électrique de l'Exposition universelle de 1889. Monographie des travaux exécutés par le syndicat international des électriciens, par Hippolyte Fontaine. 1 volume in-4° avec 29 planches tirées à part et 32 gravures dans le texte relié . . . . 25 fr.

Éclairage électrique.

Manuel pratique d'éclairage électrique pour installations particulières, maison d'habitation, usines, salles de réunion, etc., par Emile Cahen, ingénieur des ateliers de construction des manufactures de l'Etat.

Epuisé. Une nouvelle édition est en préparation.

Éclairage électrique.

Etude pratique sur l'éclairage électrique des gares de chemins de fer, ports, usines, chantiers et établissements industriels, par Georges Dumont, avec la collaboration de Gustave Baignières. 1 volume grand in-8° avec 2 planches. . . 5 fr.

Éclairage à Paris.

L'éclairage à Paris. Etude technique des divers modes d'éclairage employés à Paris sur la voie publique, dans les promenades et jardins, dans les monuments, les gares, les théâtres, les grands magasins, etc., et dans les maisons particulières. — Gaz, électricité, pétrole, huile, etc. ; usines et stations centrales, canalisations

et appareils d'éclairage ; organisation administrative et commerciale, rapports des compagnies avec la ville ; traités et conventions, calcul de l'éclairement des voies publiques ; prix de revient, par Henri Maréchal, ingénieur des ponts et chaussées. 1 volume grand in-8° avec 221 figures dans le texte, relié. . . . . 20 fr.

Éclairage des voitures de Chemins de fer.

Eclairage des voitures de chemins de fer. Huile, pétrole, gaz de houille, gaz d'huile, acétylène, gaz mixte. Electricité, par J. Carlier, ingénieur des mines. 1 volume in-8° contenant 100 figures intercalées dans le texte. . . . . . 6 fr.

Électricité.

Manuel élémentaire d'électricité, par Fleeming Jenkin, professeur à l'Université d'Edimbourg : traduit de l'anglais par N. de Tédesco. 1 volume in-12 avec 32 gravures. . . . . 2 fr.

Courants polyphasés.

Courants polyphasés et alterno-moteurs. Théorie, construction, mode de fonctionnement et qualités des générateurs et des moteurs à courants alternatifs et polyphasés, transformateurs polyphasés et mesure de la puissance dans les systèmes polyphasés, par Sylvanus P. Thompson, directeur du collège technique de Finsbury, à Londres, traduction par E. Boistel, ingénieur-expert près le tribunal de la Seine, 2e édition, 1 volume in-8° contenant 360 figures dans le texte et 12 planches hors texte et en couleurs, relié . . . . 25 fr.

Courants alternatifs.

Eléments du calcul et de la mesure des courants alternatifs, par Omer de Bast, ingénieur. Professeur à L'Ecole industrielle de Liège. 1 volume in-8° contenant 75 figures dans le texte, relié . . . . 7 fr. 50

Courants alternatifs d'électricité.

Les courants alternatifs d'électricité, par T. H. Blakesley, professeur au Royal Naval Collège de Greenwich, traduit de la 3e édition anglaise et augmenté d'un appendice, par W. C. Rechniewski. 1 volume in-12, avec figures dans le texte, relié. 7 fr. 50

Transformateurs.

Les transformateurs à courants alternatifs simples et polyphasés. Théorie, construction, applications, par Gisbert Kapp, traduit de l'allemand par A. O. Dubsky et G. Chenet, ingénieurs-électriciens. 1 volume in-8°, avec 132 figures dans le texte, relié. . . . . 12 fr.

Courant électrique différentiel.

Le courant électrique différentiel, par Emile Mangon. 1 brochure in-8°, avec figures dans le texte . . . . 2 fr. 50

Problèmes sur l'électricité.

Problèmes sur l'électricité. Recueil gradué comprenant toutes les parties de la science, par le Dr Robert Weber, professeur à l'Académie de Neuchâtel. 3e édition. 1 volume in-12, avec figures dans le texte . . . . 6 fr.

Problèmes d'électricité.

Recueil de problèmes d'électricité, par A. Raudot, ingénieur. 1 volume gr. in-8°, contenant de nombreuses figures dans le texte, relié . . . . 8 fr.

Installations électriques. Mesures de précaution.

Installations électriques d'éclairage et de transport d'énergie. Commentaires sur les mesures de précaution prescrites par l'Union des Compagnies allemandes d'Assurance contre l'incendie, par le Dr Oscar May, traduit de l'allemand sous la direction de Ph. Delahaye. 1 brochure gr. in-8°, avec 13 figures dans le texte. 1 fr. 50

Traction électrique.

La traction électrique sur voies ferrées. Types de voie. Exécution des voies. Adaptation des moteurs électriques à la traction sur les voies ferrées. Moteurs de traction. Voitures automobiles. Locomotives électriques. Matériel applicable à des cas spéciaux, services à grande vitesse, monorails, lignes à fortes rampes. Fonctionnement des moteurs de traction à courant continu et à courants alternatifs. Régulation de la vitesse des voitures. Conduite, entretien et essais des moteurs et du ma-

tériel roulant. Résistance et traction du matériel roulant électrique. Puissance et énergie électrique consommées sur les voitures et à la station génératrice. Projet de traction. Freinage des voitures électriques. Dépenses d'établissement et d'exploitation des lignes électriques. Conditions de sécurité, réglementation et contrôle technique, par André Blondel et F.-Paul Dubois, ingénieurs des ponts et chaussées. 2 volumes grand in-8°, contenant plus de 1700 pages et 1014 figures dans le texte. Reliés . . . . 50 fr.

Production et distribution de l'énergie électrique.

Production et distribution de l'énergie électrique. Puissance et organisation des stations centrales, chaudières, machines à vapeur. Stations centrales au gaz pauvre. Stations centrales hydrauliques. Machines électriques employées pour la traction. Machines à courant continu. Emploi des accumulateurs dans les stations centrales. Sous-stations de transformation. Moyens d'éviter ou de remédier aux accidents de personnes, dépenses d'établissement des stations centrales. Feeders. Lignes aériennes, Trolleys. Montage des lignes aériennes. Parafoudres, appareils accessoires des lignes aériennes. 3me rail. Caniveaux. Contacts superficiels. Retour du courant, par H. Martin, ingénieur des arts et manufactures. 1 volume grand in-8°, avec 870 figures dans le texte. Relié . . . . 25 fr.

Tramways électriques.

Les tramways électriques. Dispositions générales, voie, tramways à conducteurs aériens, souterrains, à contacts superficiels, tramways à accumulateurs, matériel roulant, dépôt, ateliers, production et transformation de l'énergie, exploitation, dépenses, concessions, réglementation, par H. Maréchal, ingénieur des ponts et chaussées, 2e édition. 1 volume in-8°, avec 188 figures dans le texte . . . 10 fr.

Chemin de fer électrique.

Chemin de fer électrique des boulevards, à Paris, par Chrétien. 1 brochure in-4°, avec gravures . . . . 2 fr.

Accumulateur au plomb.

La théorie de l'accumulateur au plomb, par le Dr Fr. Dolezalek, traduit de l'allemand par Ch. Liagre. 1 volume in-8°, avec 40 figures dans le texte . . . 8 fr.

Accumulateur voltaïque.

Traité élémentaire de l'accumulateur voltaïque, par Emile Reynier. 1 volume grand in-8°, avec 62 figures dans le texte et un portrait de M. G. Planté. . 6 fr.

Régulation des galvanomètres.

Nouveaux procédés de régulation des galvanomètres (boussoles des tangentes). Nouvelles méthodes de détermination des forces électromotrices et des résistances des piles. Applications importantes à quelques parties des méthodes générales d'expérimentation, par L. de Gérando, ingénieur de la marine. 1 brochure grand in-8°. 1 fr.

Téléphone.

Le téléphone. Théorie. Induction. Transmetteurs à charbons. Téléphones spéciaux. Lignes téléphoniques. Appareils auxiliaires. Stations terminales. Stations intermédiaires. Bureaux centraux français et étrangers. Tableaux commutateurs. Stations téléphoniques publiques. Téléphones multiplex. Application du téléphone au service de la télégraphie. Télégraphie militaire. Applications diverses, par William Henri Preece, électricien en chef du *British Post-Office*, et Julius Maier, docteur ès-sciences physiques. 1 volume grand in-8°, avec 290 gravures dans le texte. 15 fr.

Télégraphie électrique.

Traité de télégraphie électrique. Production du courant électrique. Organes de réception. Premiers appareils. Appareil Morse. Appareils accessoires. Installation des postes. Propriétés électriques des lignes. Lois de la propagation du courant. Essais électriques, recherches des dérangements. Appareils de translation, de décharge et de compensation. Description des principaux appareils et des différents systèmes de transmission. Etablissement des lignes aériennes, souterraines et sous-marines, par H. Thomas, ingénieur des télégraphes. 1 volume grand in-8°, avec 702 figures dans le texte, relié. . . . . 25 fr.

Télégraphie sous-marine.

Traité de télégraphie sous-marine. Historique. Composition et fabrication des câbles télégraphiques. Immersion et réparation des câbles sous-marins. Essais élec-

triques. Recherche des défauts. Transmission des signaux. Exploitation des lignes sous-marines. par Wunschendorff, ingénieur des télégraphes. 1 volume grand in-8°, avec 469 gravures dans le texte . . . . 40 fr.

Tirage des mines par l'électricité.

Le tirage des mines par l'électricité, par Paul-F. Chalon, ingénieur des arts et manufactures. 1 volume in-18 jésus, avec 90 figures dans le texte. Prix relié. 7 fr. 50

Electricité médicale.

Traité théorique et pratique d'électricité médicale. Précis d'électricité. Appareils et instruments électro-médicaux. Applications thérapeutiques, par Félix Lucas et André Lucas. 1 volume in-18 jésus, avec 120 figures dans le texte, relié. . 10 fr.

MÉCANIQUE ET MACHINES

Portefeuille des machines.

Portefeuille économique des machines, de l'outillage et du matériel, relatifs à la construction, à l'industrie, aux chemins de fer, aux routes, aux mines, à la navigation, à l'électricité, etc. ; contenant un choix des objets les plus intéressants des expositions industrielles ; fondé par Oppermann. 12 livraisons par an formant un beau volume de 50 à 60 planches et 200 colonnes de texte. Abonnements : Paris, 15 fr. — Départements en Belgique, 18 fr. — Union postale. . . . . . . 20 fr.

Prix de l'année parue, reliée. . . . . 20 fr.

Agenda Oppermann.

Agenda Oppermann, paraissant chaque année. Elégant carnet de poche contenant tous les chiffres et tous les renseignements techniques d'un usage journalier. Rapporteur d'angles, coupe géologique du globe terrestre, guide du métreur.— Résumé de géodésie. — Poids et mesures, monnaies françaises et étrangères. — Renseignements mathématiques et géométriques. — Renseignements physiques et chimiques. — Résistance des matériaux. — Electricité. — Règlements administratifs.— Dimensions du commerce. — Prix courants et série de prix. — Tarifs des Postes et Télégraphes.

Relié en toile, 3 fr. ; en cuir, 5 fr. — Pour l'envoi par la poste, 0 fr. 25 en plus,

Aide-mémoire de l'ingénieur.

Aide-mémoire de l'Ingénieur. Mathématiques, mécanique, physique et chimie, résistance des matériaux, statique des constructions, éléments des machines, machines motrices, constructions navales, chemins de fer, machines-outils, machines élévatoires, technologie, métallurgie du fer, constructions civiles, législation industrielle. Troisième édition française du Manuel de la Société « Hütte », par Philippe Huguenin. 1 beau volume contenant plus de 1200 pages avec 500 figures dans le texte, solidement relié en maroquin . . . . 15 fr.

Mécanique générale.

Mécanique générale. Systèmes des lignes. Centres de gravité. Moments d'inertie. Etude générale des mouvements d'un point. Détermination du mouvement d'un point. Systèmes invariables à l'état de mouvement. Mouvements simultanés et relatifs. Lois générales du mouvement des systèmes. Lois physiques du mouvement. Théorèmes généraux de la mécanique. Forces vives. Travail. Equilibre. Machines simples. Mécanismes. Cours professé à l'Ecole centrale des arts et manufactures, par A. Flamant, ingénieur en chef des ponts et chaussées. 1 volume grand in-8°, avec 203 figures dans le texte . . . . 20 fr.

Mécanique élémentaire.

Cours de mécanique élémentaire à l'usage des écoles industrielles, comprenant : Notions préliminaires ; cinématique ; statique ; résistance des mouvements ; forces centrales ; dynamique ; moments d'inertie ; résistance des matériaux ; générateurs à vapeur ; moteurs hydrauliques, par Ph. Moulan, ingénieur. 1 fort volume in-8° de 1124 pages, contenant 1067 figures dans le texte. Relié . . . . 18 fr.

Mécanique appliquée.

Cours élémentaire de mécanique appliquée, à l'usage des écoles primaires supé-

rieures, des écoles professionnelles, des écoles d'apprentissage, des écoles industrielles, des cours techniques et des ouvriers, par Bocquet, ingénieur, 4e édition. 1 volume in-12, avec 69 figures dans le texte. Relié . . . . 5 fr.

Mécanique analytique.

Cours de mécanique analytique. Dynamique. Statique et cinématique, par E. Ronkar, ingénieur honoraire des mines. 2 volumes in-4° autographiés, contenant de nombreuses figures dans le texte. 25 fr.

Nomographie.

Contribution à la théorie et aux applications de la nomographie, par R. Soreau, ingénieur. 1 volume in-8°, contenant 51 figures et 80 abaques dans le texte. 5 fr.

Traceur mécanicien.

Guide du traceur mécanicien, comprenant les notions élémentaires de géométrie, la description et l'usage des principaux outils et instruments de traçage, de mesure et de vérification, l'indication de nouvelles méthodes pour le traçage rapide et exact des pièces et organes de machines (chaudronnerie, forge, fonderie et ajustage), à l'usage des ouvriers, contremaitres, chefs d'ateliers, traceurs, dessinateurs et de toutes les personnes s'occupant du façonnage des métaux, par Philippe Fay. 3e édition. 1 volume in-8°, avec 22 planches et 292 figures . . . . 7 fr. 50

Eléments de machines.

Les éléments de machines, leur calcul et leur construction, élasticité et résistance des matériaux, procédés d'assemblage des parties de machines, éléments de machines pour la transmission du mouvement de rotation d'un arbre à un autre, autres éléments de machines pour le mouvement de rotation, éléments de machines pour le mouvement rectiligne, éléments de machines pour la transformation du mouvement rectiligne en mouvement de rotation et réciproquement, éléments des machines destinées à recevoir et à transporter les fluides, par C. Bach, professeur à l'Ecole royale technique de Stuttgart, traduit de l'allemand, par Desmarest. 1 volume grand in-8° jésus, contenant près de 600 figures et 3 planches, et 1 album de 54 planches doubles, relié. . . . . 40 fr.

Dictionnaire technologique.

Dictionnaire technologique français-allemand-anglais, contenant les termes techniques employés dans les arts et métiers, l'architecture, les ponts et chaussées et les chemins de fer, la mécanique, la métallurgie, etc., etc., par Rohrig. 3 volumes grand in-8° . . . . 45 fr.

On vend séparément :

Tome Ier : allemand-anglais-français. . . . . 15 fr.
Tome II : anglais-allemand-français. . . . . 15 fr.
Tome III : français-allemand-anglais . . . . 15 fr.

Travail manuel.

Notions sur les machines et travail manuel du fer et du bois, à l'usage des Ecoles primaires supérieures, des Ecoles d'apprentissage, des Ecoles professionnelles, des Ecoles industrielles et des candidats aux Ecoles d'arts et métiers et à l'Ecole des apprentis-mécaniciens de la marine à Brest, par Henri Lyonnet, professeur à l'Ecole supérieure municipale J.-B. Say. 1 volume in-12 avec 90 figures dans le texte . . . . 2 fr.

Aérodynamique.

Aérodynamique ou mécanique des gaz, par Piarron de Mondésir, ingénieur en chef des ponts et chaussées. 1 brochure grand in-8° . . . . 2 fr. 50

Physique.

Physique. Propriétés générales des corps. Chaleur. Optique. Acoustique Magnétisme. Electricité. Météorologie, par Gariel, ingénieur en chef des ponts et chaussées, professeur de physique à la Faculté de médecine et à l'Ecole nationale des ponts et chaussées. 2 volumes grand in-8°, avec de nombreuses gravures dans le texte . . . . 20 fr.

Étude des combustibles.

Contribution à l'étude des combustibles ; détermination industrielle de leur puissance calorifique, par R. Mahler, ingénieur civil des mines. 1 volume in-4° avec figures dans le texte et 2 planches . . . . 5 fr.

Essais des combustibles.

Analyse chimique et essais des combustibles par L. Campredon, chimiste métallurgiste, 1 brochure in-8°. . . . . 2 fr.

Chauffage industriel.

Le chauffage industriel et les fours à gaz. Utilisation de la chaleur et récupération, par Emilio Damour, ingénieur civil des mines. 1 volume in-8°, avec 27 figures dans le texte, relié. . . . . 7 fr. 50

Théorie mécanique de la chaleur et de l'électricité.

Théorie mécanique de la chaleur et de l'électricité, par Clausius. 2e édition refondue et complétée, traduite sur la 3e édition de l'original allemand, par F. Folie et E. Ronkar, chargés de cours à l'Université de Liège, 2 volumes in-8, avec figures dans le texte. Relié . . . . 20 fr.

Chaleur.

Traité élémentaire de la chaleur au point de vue de son emploi comme force motrice. Machines à air chaud, à gaz, à air comprimé et machines à vapeur par Devillez, 2 volumes in-8°, avec planches . . . . 15 fr.

Air comprimé.

Traité élémentaire de l'air comprimé, par Joseph Costa, ingénieur civil, ancien élève de l'Ecole polytechnique. 1 volume grand in-8°, avec figures dans le texte. *Epuisé. Une nouvelle édition est en préparation.*

Chaudronnerie en cuivre et en fer.

Traité de la Chaudronnerie industrielle en cuivre et en fer. Outillage, tracé et coupes, construction des appareils industriels. Leçons professées au Cours de chaudronnerie fondé à l'Association philotechnique par E. Bréhier, ingénieur civil. 1 volume grand in-8° contenant 370 figures dans le texte et 38 tableaux 10 fr.

Chaudronnerie.

Cours pratique de chaudronnerie. 1re partie : Chaudronnerie en fer, par A. Montupet. 4e édition, revue et augmentée. 1 volume in-8° avec 44 planches et tableaux . . . . 7 fr. 50

Installation de chaudières à vapeur.

Installations modernes de chaudières à vapeur, leurs dispositions et leur emploi. Chaudières à grand volume d'eau, chaudières multitubulaires, chaudières sans maçonnerie, règlements relatifs à l'autorisation, à l'épreuve et à l'inspection des chaudières à vapeur. Manuel et formulaire à l'usage des industriels, des étudiants et des ingénieurs, par E. Reinert, ingénieur à la Société badoise, traduit par L. Desmarest, ingénieur civil, 1 volume grand in-8° contenant 150 figures dans le texte. Relié. . . . . 12 fr. 50

Traité des chaudières à vapeur.

Traité des chaudières à vapeur. Etude sur la vaporisation dans les appareils industriels. Ebullition à l'air libre. Ebullition en vase clos. Soulèvements et entraînements d'eau. Transmission de la chaleur. Puissance de vaporisation des surfaces de chauffe. Températures des surfaces de chauffe. Absorption de la chaleur par l'eau. Circulation de l'eau. Appareils produisant la circulation de l'eau. Généralités et classification des chaudières. Chaudières à foyer intérieur. Chaudières à foyer extérieur. Chaudières multitubulaires et leur fonctionnement. Chaudières multitubulaires de torpilleurs. Chaudières à émulsion de vapeur. Accidents et explosions. Effets dynamiques des explosions. Combustion, par Charles Bellens, ingénieur. 1 volume grand in-8° avec 215 figures dans le texte, relié. . . . . 20 fr.

Chaudières à vapeur.

Traité pratique des chaudières à vapeur employées dans les manufactures par Denfer, chef de travaux graphiques à l'Ecole centrale des arts et manufactures. 1 volume grand in-4°, accompagné de 81 planches cotées et en couleurs . . . . 50 fr.

Chaudières marines.

Traité pratique des chaudières marines ; description, entretien, conduite. Princi-

paux types de chaudières. Chaudières de torpilleurs. Chauffage mixte. Ejecteurs, conduite des feux et des chaudières. Alimentation pendant la marche. Extractions. Extinction des feux. Chaudières Belleville, Dutemple, Petit et Godard. Procédé Dubourdin, à l'usage des mécaniciens de la marine militaire, de la marine de commerce et de l'industrie, par J. B. GIRARD, mécanicien-inspecteur de la marine, 1 volume in-8°, avec de nombreuses figures dans le texte et 20 planches, relié. . 12 fr. 50

Chaudières à vapeur.

Contribution à l'étude du fonctionnement des chaudières à vapeur. Epuration de l'eau d'alimentation, incrustation, entraînement de l'eau par la vapeur, par JEAN DE MOLLINS, 1 brochure grand in-8° . . . . 1 fr.

Défauts des chaudières.

Défauts des chaudières de locomotives et des locomobiles. Caractères des défauts, leurs causes, conséquences à craindre, mesures préventives et remèdes à employer. — Travail publié par l'association des ingénieurs et architectes autrichiens, M. l'ingénieur en chef WEHRENFENNIG rapporteur ; traduit de l'allemand par EDM. FRANCKEN, ingénieur honoraire des mines, et CARL VON HAHN, docteur en droit, 1 volume in-4° avec de nombreuses figures dans le texte. . . . . . . 5 fr.

Épreuves des chaudières à vapeur.

Note sur les épreuves des chaudières à vapeur, suivie de la loi du 21 juillet 1856, concernant les contraventions aux règlements sur les appareils et bateaux à vapeur et la loi du 18 juillet 1892 fixant les nouvelles taxes d'épreuves des appareils à vapeur et leur mode de perception, par H. MATHIEU, contrôleur des mines. 1 brochure grand in-8°. . . . . 1 fr. 50

Explosions de chaudières à vapeur.

Les explosions de chaudières à vapeur. Leurs causes et leurs effets, et examen critique des moyens préventifs, par HERVIER, ingénieur civil des mines. 1 volume grand in-8° . . . . 6 fr.

Les chauffeurs-mécaniciens et les explosions de chaudières à vapeur, par le même auteur. 1 volume grand in-8° . . . . 1 fr.

Manuel du chauffeur.

Guide manuel du chauffeur, par GOUJET, constructeur-mécanicien. 1 volume grand in-8° . . . . 3 fr. 50

Manuel du chauffeur mécanicien.

Manuel du chauffeur-mécanicien et du propriétaire d'appareils à vapeur, par HENRI MATHIEU contrôleur des mines, 2e édition. 1 volume grand in-8°, avec 720 figures dans le texte. Relié. . . . . 25 fr.

L'A B C du chauffeur.

L'A B C du chauffeur, par HENRI MATHIEU, contrôleur des mines, avec introduction C. WALCKENAER, ingénieur des mines. 1 vol. format 0m,15 × 0m,10, avec 66 figures dans le texte, relié. . . . . 3 fr.

Catéchisme des chauffeurs.

Catéchisme des chauffeurs et des conducteurs de machines, rédigé sous les auspices de l'Association des ingénieurs sortis de l'école de Liège, par BEER, DEVAUX, DECHAMPS et STÉVART. 5e édition, revue et augmentée. 1 volume in-8°, cartonné . . . . 1 fr. 50

Machines marines.

Traité pratique des machines marines motrices, des machines auxiliaires, des machines à pétrole et à gaz. Description, montage, régulation, conduite, réparations. Rédigé conformément aux programmes. A l'usage des mécaniciens de la marine militaire et à ceux de la marine du commerce. Avec les planches des nouveaux types de machines motrices et auxiliaires et des machines à pétrole et à gaz, par J.-B. GIRARD, mécanicien-inspecteur de la marine. 2 volumes in-8° contenant plus de 800 figures dans le texte et 33 planches hors texte. Reliés . . 30 fr.

Construction des machines à vapeur.

Traité pratique de la construction des machines à vapeur fixes et marines. Résumé des connaissances actuellement acquises sur les machines à vapeur, consi-

dérations relatives au type de machine et aux proportions à adopter, détermination des dimensions et des proportions des principaux organes, étude et construction de ces organes, par Maurice Demoulin, ingénieur des arts et manufactures. 1 volume grand in-8°, avec 483 figures dans le texte. Relié . . . . 20 fr.

La Machine à vapeur.

La machine à vapeur. Traité général contenant la théorie du travail de la vapeur, l'examen des mécanismes de distribution et de régularisation, la description des principaux types d'appareils, l'étude de la condensation et de la production de la vapeur, par Edouard Sauvage, professeur à l'Ecole nationale supérieure des mines, 2 volumes grand in-8° jésus, avec 1 036 figures dans le texte. Relié . . . . 60 fr.

Traité de la machine à vapeur.

Traité de la machine à vapeur. Description des principaux types et théorie, étude, construction, conduite et applications, par Robert H. Thurston, directeur du « Sibley College » Cornell University, traduit de l'anglais et annoté par Maurice Demoulin. 2 volumes grand in-8° avec de nombreuses figures dans le texte. Relié . . . . 60 fr.

Essais de machines et chaudières à vapeur.

Manuel pratique des essais de machines et chaudières à vapeur, par Robert H. Thurston, directeur du « Sibley College » Cornell University, traduit de l'anglais par Auguste Rousset, ancien élève de l'Ecole polytechnique. 1 volume grand in-8° avec de nombreuses figures dans le texte. Relié . . . . 25 fr.

Essai des moteurs (Guide pour l').

Guide pour l'essai des moteurs. Ouvrage contenant tout ce qui a rapport aux indicateurs, l'analyse des diagrammes, le travail indiqué, les freins de Prony ordinaires et automatiques, les dynamomètres de transmission, les essais de vaporisation, les proportions des générateurs et cheminées, etc., par J. Buchetti, ingénieur E. C. Paris. 3e édition, 1 vol. in-8°, avec 178 figures dont 28 pl. relié . . . . 15 fr.

Les machines à vapeur actuelles.

Les machines à vapeur actuelles, par J. Buchetti, ingénieur E. C. Paris.
1re *partie :* Calculs des machines, texte in-4° avec 127 figures et 2 pl. }
2e *partie :* Distributions, texte in-4° et atlas de 18 planches . . . . . . } 40 fr.
3e *partie :* Construction, texte in-4° avec 181 figures et atlas de 50 pl. 50 fr.
Les 3 parties prises ensemble . . . . 75 fr.
Supplément a l'ouvrage ci-dessus : Machines simples, compound, à triple expansion, a vitesse normale, à grande vitesse, 1 vol. in-4° et 1 atlas in-folio de 20 planches . . . . 30 fr.

Machines à vapeur.

Les machines à vapeur à l'Exposition universelle de Paris en 1889, par J. Buchetti, ingénieur E. C. Paris. 1 vol. in-4° avec 53 figures dans le texte et 1 atlas in-folio de 40 planches . . . . 50 fr.

Machines à vapeur.

Traité théorique et pratique des machines à vapeur au point de vue de la distribution. — Méthode générale des gabarits, permettant d'établir des épures approchées ou exactes de tous les types de machines. — Etude méthodique des principales distributions au double point de vue de leur fonctionnement et de leur construction, par Coste et Maniquet. 2e édition. 1 volume grand in-8° contenant 54 figures intercalées dans le texte et 1 atlas grand in-4° de 46 planches de dessins exactement réduits à l'échelle et cotés . . . . 25 fr.

Machines à vapeur.

Etude sur les machines à vapeur. Moteurs à vapeur pour les petites industries et moteurs à vapeur de grandes dimensions, à l'exposition des arts et métiers de Vienne (Autriche), 1888, par A. Gouvy fils, ingénieur des arts et manufactures. 1 brochure grand in-8°, avec 3 grandes planches et 16 figures dans le texte . . . . 4 fr.

Indicateur des machines.

L'indicateur du travail et du fonctionnement des machines à piston, à vapeur

à eau, à gaz, etc., et son diagramme, par Von Pichler, traduit par R. Seguela, ancien élève de l'École polytechnique. 1 volume in-8° avec 46 figures dans le texte . . . . . 5 fr.

Enveloppes de vapeur.

Recherches expérimentales sur l'emploi des enveloppes de vapeur et du fonctionnement compound dans les locomotives effectuées sur les chemins de fer sud-ouest russe, par A. Borodine, ingénieur en chef du matériel et de la traction. 1 volume grand in-8°, avec 3 grandes planches . . . . . 6 fr.

Transport de la vapeur.

Le transport de la vapeur à grandes distances et sa canalisation. Renseignements théoriques et pratiques, condensation dans les tuyaux, enveloppes calorifuges, établissement des conduites, prix de revient des tuyaux, par Chrétien. 1 brochure grand in-8° avec figures dans le texte . . . . . 2 fr

Locomotives.

Traité pratique de la machine locomotive comprenant les principes généraux relatifs à l'étude et à la construction des locomotives, la description des types les plus répandus, l'étude de la combustion, de la production et de l'utilisation de la vapeur, du rendement, des conditions de fabrication et de réception des matériaux, des proportions et du mode de construction des organes, par Maurice Demoulin, ingénieur des arts et manufactures. Ouvrage précédé d'une introduction par Edouard Sauvage, professeur à l'Ecole supérieure des mines. 4 volumes grand in-8°, avec 973 figures et planches dans le texte et 6 planches hors texte. Relié . . . . . 150 fr.

Locomotives.

Note sur la construction des locomotives en Angleterre, par Maurice Demoulin, ingénieur des arts et manufactures. 1 brochure grand in-8, avec 2 grandes planches . . . . . 3 fr.

Locomotives.

La machine-locomotive. Manuel pratique donnant la description des organes et du fonctionnement de la locomotive, à l'usage des mécaniciens et des chauffeurs, par Edouard Sauvage, ingénieur en chef adjoint du Matériel et de la Traction de la compagnie des chemins de fer de l'Est 3e édition. 1 volume in-8° avec 324 figures dans le texte. Relié . . . . . 5 fr.

Locomotives.

Machine locomotive à grande vitesse de 750 chevaux, étudiée par Ala Béothy, ingénieur. 1 brochure grand in-8°, avec 5 planches . . . . . 5 fr.

Locomotives.

Les locomotives à l'Exposition universelle de 1878, par A. Mallet. — Locomotives françaises et étrangères. — Machines express. — Machines à voyageurs. — Machines à marchandises. — Machines pour services spéciaux. — Locomotives pour voie étroite. 1 volume in-8° avec 2 grandes planches et 1 tableau . . . 5 fr.

Locomotives.

Etude sur l'utilisation de la vapeur dans les locomotives et l'application à ces machines du fonctionnement compound, par A. Mallet. 1 volume in-8, avec tables et planches . . . . . 7 fr.

Locomotives suisses.

Les locomotives suisses, par Camille Barbey. 1 volume grand in-4°, illustré de 80 phototypies, de 81 planches hors texte et d'une carte des chemins de fer suisses. 40 fr.

Servo-moteur.

Le servo-moteur ou moteur asservi, par Farcot. Ses principes constitutifs, variantes diverses, application à la manœuvre des gouvernails. 1 volume in-8° avec 37 planches . . . . . 4 fr.

Moteurs à gaz.

Théorie des moteurs à gaz. Conférences faites à l'*automobile Club de France*, par GEORGE MOREAU, ancien élève de l'Ecole polytechnique. 1 volume in-8°. 12 fr. 50

Moteurs à explosion.

Les moteurs à explosion ; étude à l'usage des constructeurs et conducteurs d automobiles, comprenant : des éléments de thermodynamique et de résistance des matériaux, l'établissement des moteurs et de leurs cycles, les principes de construction des pièces de machine, l'analyse des perturbations dues soit à la nature des phénomènes, soit à l'emploi des organes, l'examen des propriétés des combustibles employés et du régime de la détonation, l'exposé des principes devant servir de bases à la comparaison des voitures automobiles et particulièrement aux courses, etc., etc., par GEORGE MOREAU, ancien élève de l'Ecole polytechnique. 1 volume grand in-8°, avec 104 figures dans le texte. Relié. 20 fr.

Voitures automobiles.

Manuel théorique et pratique de l'automobile sur route. 1° Agents de la locomotion automobile. 2° Eléments des voitures automobiles, chaudières, moteurs à vapeur, carburateurs, moteurs à pétrole, accumulateurs, moteurs électriques. Vapeur. Pétrole. Electricité. Transmissions. Le véhicule, essieux, roues, bandages, ressorts, châssis, caisse, freins, graissage. 3° Voitures, omnibus, camions, tracteurs, voitures légères, avant-train moteurs, tricycles, quadricycles, voiturettes, voitures de livraisons. Divers types de voitures. Compte rendu des principales courses et concours, par GÉRARD LAVERGNE, ancien élève de l'Ecole polytechnique. 1 volume grand in-8° contenant 329 figures dans le texte. Relié. . . . . 17 fr. 50

Régulateurs.

Nouvelle théorie élémentaire des régulateurs à force centrifuge, examen de leurs principales propriétés. Isochronisme. — Sensibilité. — Régularité. — Energie. — Stabilité. — Régulateurs proportionnels, par E. LINGLIN, ingénieur-mécanicien. 1 volume in-8° avec 30 figures dans le texte . . . . 2 fr. 50

Gazogènes.

Les gazogènes continus et discontinus, et la manière de s'en servir, par G. VELLEMAN, ingénieur civil des mines. 1 volume in-8°, accompagné d'un plan d'usine pour la fabrication du coke. . . . . 4 fr.

Traité des machines-outils.

Traité des machines-outils. Tours, alésoirs, raboteuses, mortaiseuses, étaux-limeurs, raineuses, fraiseuses, machines à tailler les roues, meules, taraudeuses, machines à vis, machines spéciales, machines combinées, petit outillage, par GUSTAVE RICHARD, ingénieur civil des mines. 2 volumes grand in-4° avec plus de 6 000 figures dans le texte. Relié. 150 fr.

Mesure du travail des machines-outils, etc.

De la mesure du travail mécanique et électrique des machines-outils, etc.; et construction des Appareils, par J. BUCHETTI, ingénieur E. C. Paris. 1 volume de texte avec figures et 15 planches. . . . . 15 fr.

Arquebuserie.

Traité d'arquebuserie. Principes de la construction des armes de chasse ; canonnerie des armes de chasse ; les armes à chiens intérieurs ; les armes de tir ; les cartouches ; les poudres ; les projectiles ; annexes, par ARTHUR NOUVELLE. 1 volume grand in-8° et 1 atlas de 38 planches. . . . . 20 fr.

Transmissions.

Calcul et construction des transmissions, par le Dr KARL KELLER, professeur de cours de construction de machines à l'Ecole supérieure technique de Karlsruhe Traduit sur la 3e édition allemande, par H. SOUDÉ et DESMAREST, ingénieurs civils. 1 volume grand in-8° avec 450 figures dans le texte. Relié. . . . . 15 fr.

Filetage.

Traité pratique de filetage à l'usage de tous les mécaniciens, par CADY. 8e édition revue, corrigée et augmentée d'un chapitre pour les tours anglais, de méthodes pour faire les cônes automatiquement, du filetage à l'aiguille, d'une méthode pour faire les outils à fileter, etc. 1 volume in-12, avec 4 planches. . . . . . . 2 fr.

Filetage.

Le filetage rendu facile à tous. — Barème de filetage donnant 1 550 pas de vis différents et s'appliquant à tous les tours à fileter dont la mère vis est à un pas exprimé en millimètres sans fraction ; soit : 5, 8, 10, etc.; par E. Bérard, mécanicien. 1 brochure in-8° . . . . 1 fr. 50

Hydraulique.

Mécanique appliquée. Hydraulique. Hydrostatique. Généralités sur le mouvement des liquides. Circonstances accidentelles du mouvement. Tuyaux de conduite. Canaux découverts. Cours d'eau naturels. Mouvements non permanents. Mouvements ondulatoires. Fluides élastiques. Résistance des fluides. Documents et renseignements concernant les irrigations. Abaque pour le calcul des distributions d'eau. Tables numériques, par A. Flamant, ingénieur en chef des ponts et chaussées. *2e édition considérablement augmentée.* 1 volume grand in-8° avec 137 figures dans texte. . . . . 25 fr.

Hydraulique.

Recherches théoriques et expérimentales sur les oscillations de l'eau et les machines hydrauliques à colonnes liquides oscillantes. — Oscillations dans les tuyaux, ondes liquides, phénomènes de succion, fontaines intermittentes, écluses de navigation, moteurs hydrauliques, machines élévatoires, machines d'épuisement, machines soufflantes et à comprimer l'air, pompes, etc., par le marquis Anatole de Caligny, correspondant de l'Institut de France. 2 volumes in-8°, avec 8 planches. . 16 fr.

Moteurs hydrauliques actuels.

Les moteurs hydrauliques actuels. (Roues et turbines.) Traité théorique et pratique, par J. Buchetti, ingénieur E. C. Paris. 2e édition. *1re Partie :* Calculs et conditions d'établissement. 1 volume in-4°, avec 140 figures dans le texte. *2e Partie :* Construction. 1 volume in-4°, avec 95 figures dans le texte et 1 atlas in-folio de 40 planches. . . . . 60 fr.

Les turbines actuelles.

Les turbines actuelles et à l'Exposition universelle de 1900, par J. Buchetti, ingénieur E. C. Paris. 1 volume de texte avec 68 figures et 1 atlas de 30 planches . . . . 40 fr.

Élévation des eaux.

Traité de l'élévation des eaux. Calculs et renseignements pratiques. Pompes à main. — Emploi des moteurs à vent et à eau. — Pompes centrifuges. — Emploi des moteurs à vapeur, à gaz, électriques. — Pompes d'alimentation. — Appareils hydrauliques. — Ascenseurs. — Emploi de l'air et des gaz comprimés. — Pulsomètres. — Injecteurs — Éjecteurs. — Béliers hydrauliques, par P. Berthot, ingénieur des arts et manufactures. 1 volume grand in-8° avec 350 figures dans le texte. Relié. . . . . 18 fr.

Pompes centrifuges et rotatives.

Les pompes centrifuges et rotatives. Théorie pratique, construction, installation, par J. Buchetti, ingénieur E. C. Paris. 1 volume in-8° avec 35 figures dans le texte et 10 grandes planches. . . . . 15 fr.

Architecture et construction du yacht.

Architecture et construction du yacht, par Louis Moissenet, membre fondateur de l'Union des yachts français. 1 volume in-18, avec de nombreuses figures dans le texte et 16 planches, relié . . . . 10 fr.

Voilure, navigation et manœuvre du yacht.

Voilure navigation et manœuvre du yacht, par Louis Moissenet, ingénieur au corps du Génie maritime. 1 volume in-18, avec 28 planches dans le texte comprenant 149 figures, relié . . . . 15 fr.

Théorie du yacht.

Théorie du yacht, par Louis Moissenet, ingénieur au corps du Génie maritime. 1 volume in-18, avec 158 figures dans le texte . . . . 15 fr.

Navigation sous-marine.

La navigation sous-marine. Généralités et historique. Théorie du sous-marin. Bateaux sous-marins modernes. La Guerre maritime, par Maurice Gaget. 1 volume in-12, contenant 131 figures dans le texte. Relié. . . . . 10 fr.

Navigation sous-marine.

Navigation sous-marine. Historique des bateaux sous-marins et mécanismes nécessaires à leur marche. — Variétés électriques, par A. Dessaint, 1 brochure grand in-8°, avec 7 planches . . . . 2 fr. 50

Ballons dirigeables.

Les dirigeables, étude complète de la direction des ballons, des tentatives réalisées et des projets nouveaux. Origines de l'aéronautique. Théorie du ballon libre. Construction d'un aérostat. Construction d'un dirigeable. Gonflement et lancement. Instruments d'observation. Condition du problème de la dirigeabilité. Résistance à l'avancement. Propulsion. Stabilité. Moteurs légers pouvant être appliqués aux ballons dirigeables. Dirigeables divers, par M.-H. André, ingénieur civil. 1 volume in-8° avec 98 figures dans le texte. Relié . . . . 12 fr. 50

Traité d'aérostation.

Traité d'aérostation théorique et pratique. Construction des ballons et des engins accessoires, appareils à gaz hydrogène, manœuvres à terre et en l'air, ascensions captives, appareils d'aérostation militaire, navigation aérienne avec aéroplanes. Guide complet à l'usage des sociétés d'aérostation françaises et étrangères, des aéronautes professionnels, des aérostiers militaires, des élèves, des amateurs et de toutes les personnes s'intéressant à l'aérostation et à la navigation aérienne, par Henry de Graffigny. 1 volume in-18 avec 77 figures dans le texte. . . . . 4 fr.

ÉVREUX, IMPRIMERIE DE CHARLES HÉRISSEY





